

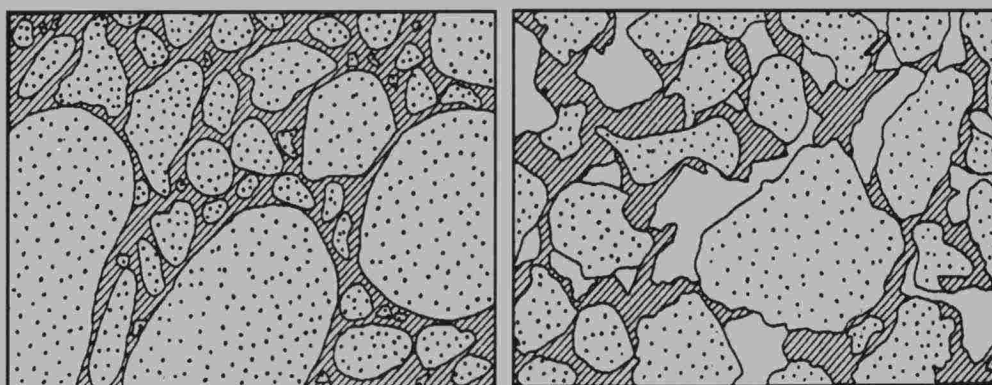


Tielaitos

Kirsi Ylipiessa

# Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1

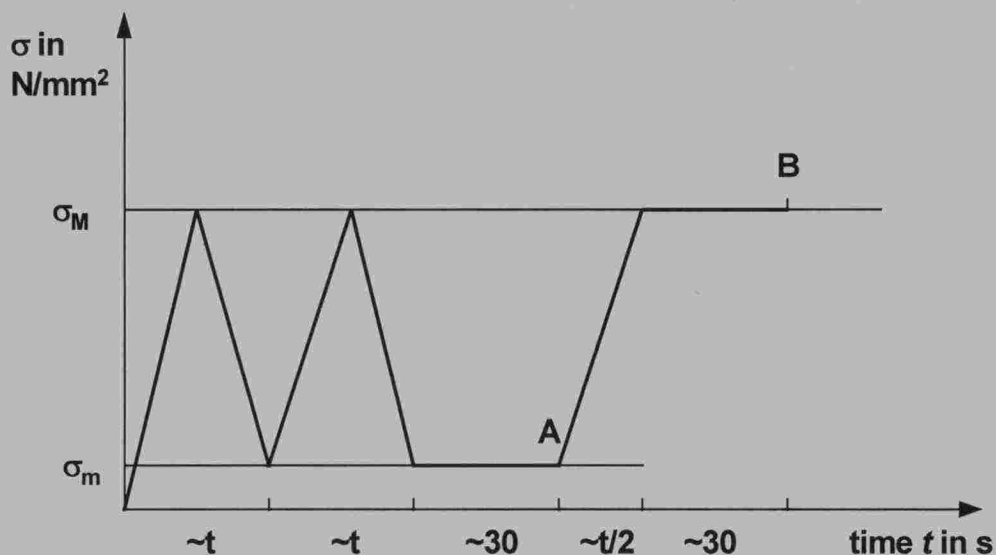
Sementillä sidotut materiaalit  
Kirjallisuusselvitys



Betoni.



Sementtistabilointi.



Tielaitoksen  
selvityksiä

23/1998

Oulu 1998

TUOTANTO  
Konsultointi

Tielaitoksen selvityksiä  
23/1998

Kirsi Ylipiessa

## **Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1**

**Sementillä sidotut materiaalit  
Kirjallisuusselvitys**

**Tielaitos**  
TUOTANTO, konsultointi

Oulu 1998

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-726-437-2  
TIEL 3200514  
Oy Edita Ab  
Helsinki 1998

Julkaisun myynti:  
Tielaitos, kirjasto  
Telefax 0204 44 2652



Painotuote

### **Tielaitos**

TUOTANTO  
Opastinsilta 12 B  
PL 157  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde 0204 44 150

### **Konsultointi**

Oulun kehitysyksikkö  
Vanhantullinkatu 2  
PL 261  
90101 OULU  
Puh. vaihde 0204 44 158

## **TIIVISTELMÄ**

Tienpidon painopisteen siirtyessä yhä enemmän tieverkon kunnon ylläpitoon, korostuu tiessä olevien materiaalien uudelleenkäyttö yhdessä paikallisten materiaalien kanssa. Myös perinteisten hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttö vähenee, niiden käytölle asetetaan rajoituksia ja samalla niiden saatavuus vaikeutuu. Korvaavien nykyiset laatuksiteerit alittavien materiaalien käyttö tulee tästä syystä lisääntymään. Laadun parantamiseksi materiaali joudutaan usein käsittelemään joko mekaanisesti tai sitomalla se jonkin sideaineen avulla.

Uusien materiaalien käyttö edellyttää ajantasalla olevia laatuksiteerejä ja niihin liittyviä tutkimusmenetelmiä. Lisäksi nykyisin käytössä olevasta tielaitoksen sementtistabilointiohjeesta puuttuvat täsmälliset ohjeet siitä, kuinka ilmasto-olosuhteiden vaikutukset tulisi huomioida hydraulisesti sidotuissa kerroksissa. Tämän kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli selvittää eri maiden sementtistabiloinnin laadunvarmistusmenetelmiä ja verrata niitä suomalaisen käytäntöön.

Sementtistabilointi eroaa betonoinnista siten, että stabiloinnissa sementtipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin betonissa ja lujitettava maa-aines ei ole betonisoran kaltaista suhteistunutta kiviainesta. Stabiloinnin tavoitteena on parantaa maa-aineksen ominaisuuksia mm. eroosion kestävyys ja routivuuden osalta. Tärkein tavoite on kuitenkin lujuuden lisääminen.

Sementtistabiloinnin ja laadunvarmistuksen vertailua eri maiden välillä vaikeuttaa epäyhtenäinen terminologia. Periaatteessa kuitenkin useimmissa maissa tienrakennuksessa käytetään kolmen tyyppistä stabilointia: heikkolaatuisen maan stabilointi (pohjamaa, suodatinkerros), tien rakennekerrosten (jakava, kantava) vaatimukset täyttävä stabilointi sekä edellistä korkeammat vaatimukset täyttävä hyvälaatuinen stabilointi (kulutuskerros, kantava kerros raskaasti liikennöidyillä teillä).

Yleisimmin sementillä stabiloitujen materiaalien laatua arvioidaan lujuustestien perusteella. Lujuutta voidaan testata usealla eri tavalla, joista yksiaksiaalilla puristuskokeella määritetty puristuslujuus on yleisimmin käytetty. Lujuus voidaan määrittää myös vetolujuutena veto-, halkaisuveto- tai taivutusvetokokeella. Eri maiden lujuusksiteerit eivät kuitenkaan ole suoraan verrattavissa keskenään, koska mm. koekappaleiden koko ja muoto sekä valmistus-, säilytys- ja koestusmenetelmät vaihtelevat.

Sementtistabiloinnin kantavuusominaisuuksien arviointiin käytetään CBR-koetta sekä erilaisia kimmomoduulin määrittämismenetelmiä. CBR-koetta käytetään lähinnä heikkolaatuisten materiaalien stabiloinnin laadunvarmistukseen. Kimmomoduuli voidaan laboratoriossa määrittää yksi- tai kolmiaksiaalikokeella, taivutuskokeella, resonant-column -menetelmällä tai electro-



dynamic -menetelmällä. Koska lujuudeltaan samanlaisten materiaalien kimomoduuli vaihtelee huomattavasti eri stabilointityyppien välillä, ei materiaalien luokittelu yksinomaan lujuuden perusteella ole tienrakennuksen kannalta tarkoituksenmukaista.

Sementtistabiloinnin säänkestävyys on myös yleisesti käytetty laadunvarmistuksen kriteeri. Säänkestävyystesteihin lasketaan kuuluvaksi vedenkestävyytestit (vesiupotuskoe ja märkä-kuivakoe) sekä pakkasenkestävyytestit (routanousu- ja jäädytys-sulatuskoe). Säänkestävyyttä tutkitaan yleensä jonkun muun ominaisuuden (esim. lujuus) ohella tai tarvittaessa.

**Key words:** road structure, structure layer, cement stabilization

## ABSTRACT

As the focus of road maintenance shifts more and more into maintenance of road networks, the re-use of road materials together with local materials enhances. At the same time, the use of traditional good-quality natural materials is reduced, limitations are set on their use and their availability becomes difficult. For these reasons, the use of replacing materials that are below present quality standards will increase. To improve quality it is often necessary to process the material either mechanically or by binding it using a binding agent.

The utilisation of new materials requires up-to-date quality standards and relevant research methods. Moreover, the presently used cement stabilization codes by the Finnish National Road Administration lack the precise instructions for taking climatic conditions into consideration in hydraulically bound layers. The aim of this literature study was to look into quality control methods of cement stabilization in different countries and to compare them with the Finnish practise.

Compared to concrete, the amount of binding agent used in cement stabilization is significantly smaller and the stabilized soil material is not a uniformly gradated rock material like concrete gravel. The aim of stabilization is to improve the properties of a soil material, e.g. erosion durability and frost susceptibility. The most important objective however is to increase strength.

Comparisons of cement stabilization and quality control between different countries are complicated by non-uniform terminology. In principle, however, three types of stabilization are used in road construction: stabilization of weak-quality soils (subsoil, filter layer), stabilization that meets the requirements for structural road layers (sub-base, basecourse), and stabilization that meets higher requirements than the above mentioned (wearing course, basecourse in roads under heavy traffic).

Strength tests are most generally used to estimate the quality of cement stabilized materials. Strength can be tested in many ways, and compressive strength determined by direct axial testing is the most common. Strength can also be determined by direct tensile strength test, indirect tensile strength test or flexural strength test. Strength criteria in different countries are not directly comparable due to e.g. variations in size and shape of test samples and in preparation, storage and testing methods.

CBR-tests and various determination methods for elastic modulus were used to estimate bearing capacity properties of cement stabilization. The CBR-test is mainly used for quality control in stabilization of materials of inferior quality. Elastic modulus can be determined in the laboratory by direct axial or triaxial testing, bending test, or using resonant-column or electro-dynamic

technique. Since elastic modulus for materials with similar strength varies greatly between different stabilization types, the classification of materials based solely on strength is not appropriate in road construction.

Weather durability of cement stabilization is also a commonly used criterion in quality control. Weather durability tests include water durability tests (water immersion test and wetting and drying test) and freeze durability tests (freezing and thawing test and frost-heave test). Weather durability is usually studied along with some other property (e.g. strength) or if needed.



## ALKUSANAT

Tielaitoksen Oulun kehitysyksikkö käynnisti hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistusta käsittelevän tutkimuksen osana kerrosrakenteiden laadunvarmistuksen kehittämistä vuonna 1996.

Tutkimus aloitettiin sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskäyttäytymistä koskevalla tutkimuksella. Syynä tutkimuksen aloittamiseen olivat tielaitoksen sementtistabilointiohjeissa todetut puutteet. Ohjeistosta puuttuu mm. laadunvarmistusohjeet siitä, miten tierakenteen jäätymis-sulamisilmiöstä aiheutuvat hydraulisesti sidottujen kerrosten vaurioitumisriskit tulisi ehkäistä. Lisäksi ohjeistosta puuttuu kokonaan heikkolaatuaisille materiaaleille tarkoitetut laatukriteerit, joiden tarve korostuu entisestään sidottujen rakenteiden ja heikkolaatuisten materiaalien käytön lisääntyessä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten toistuvat jäätymis-sulamissyklit vaikuttavat eri tyyppisten sementillä sidottujen materiaalien routakestävyyteen, lujuuteen ja muodonmuutosominaisuuksiin sekä sidotun kantavan kerroksen pitkäaikaikäkäyttäytymiseen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää laboratorio-olosuhteissa tehtävien koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen merkitys sementillä sidotun materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Tutkimuksen tuloksena laaditaan suositukset sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskäyttäytymisen laatukriteereistä sekä niiden edellyttämistä laboratoriotutkimuksista ja laadunvalvonnasta.

Tutkimuksen on tilannut tielaitoksen tie- ja liikennetekniikan yksikkö (Htl) ja rahoittanut tielaitos ja Finnsementti Oy. Tutkimus on tehty diplomityönä Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Tehdyn diplomityön aineistosta on laadittu kolme erillistä raporttia, jotka on julkaistu tielaitoksen julkaisusarjassa. Raportit on kirjoittanut diplomityöntekijä tekn. yo Kirsi Ylipiessa. Nyt käsiläoleva raportti on julkaisusarjan ensimmäinen osa, jossa käsitellään tutkimusaihetta kirjallisuusselvityksen pohjalta. Muut osaraportit ovat:

- Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen
- Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys

Työn ohjauksesta ja valvonnasta on vastannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet TkT Kauko Kujala Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriosta, DI Kurt Lundström Finnsementti Oy:stä sekä DI Seppo Salmenkaita ja Ins. Heikki Vesa tielaitoksen konsultoinnin Oulun kehitysyksiköstä.

Oulussa kesäkuussa 1998

Konsultointi

Oulun kehitysyksikkö



<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 SEMENTTISTABILOINNIN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT</b>	<b>10</b>
2.1 Yleistä	10
2.2 Kemialliset tekijät	11
2.3 Fysikaaliset tekijät	12
2.4 Ulkoiset tekijät	17
<b>3 SEMENTTISTABILOINTI ERI MAISSA</b>	<b>18</b>
3.1 Terminologia	18
3.2 Materiaalivaatimukset	19
3.2.1 Runkoaineet	19
3.2.2 Sideaineet	23
3.2.3 Vesi	24
3.3 Stabilointimassan kelpoisuusvaatimukset ja testimenetelmät	25
3.3.1 Puristuslujuus	25
3.3.2 Vetolujuus	30
3.3.3 CBR-koe	36
3.3.4 Muodonmuutosominaisuudet	36
3.3.5 Säänkestävyys	41
<b>4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>46</b>
<b>5 KIRJALLISUUS</b>	<b>49</b>

## 1 JOHDANTO

Tienpidon painopisteen siirtyessä yhä enemmän tieverkon kunnon ylläpitoon, korostuu tiessä olevien materiaalien uudelleenkäyttö yhdessä paikallisten materiaalien kanssa. Myös kestävän kehityksen periaatteet ohjaavat materiaalien käyttöä. Perinteisten hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttö vähenee, niiden käytölle asetetaan rajoituksia ja samalla niiden saatavuus vaikeutuu. Korvaavien, nykyiset laatukriteerit alittavien, materiaalien käyttö tulee tästä syystä lisääntymään. Merkittäväksi vaihtoehdoksi materiaalien hankinnassa tulee rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä saatavien materiaalien käyttö. Laadun parantamiseksi materiaali joudutaan usein käsittelemään joko mekaanisesti tai sitomalla se jonkin sideaineen avulla.

Uusien materiaalien käyttö edellyttää ajantasalla olevia laatukriteerejä ja niihin liittyviä tutkimusmenetelmiä. Sidotun rakennekerroksen suunnittelussa ei riitä nykyisin Suomessa käytettävä yksinomaan puristuslujuuteen perustuva mitoituskriteeri, vaan huomioon on otettava myös ilmasto-olosuhteiden aiheuttamat rasitustekijät.

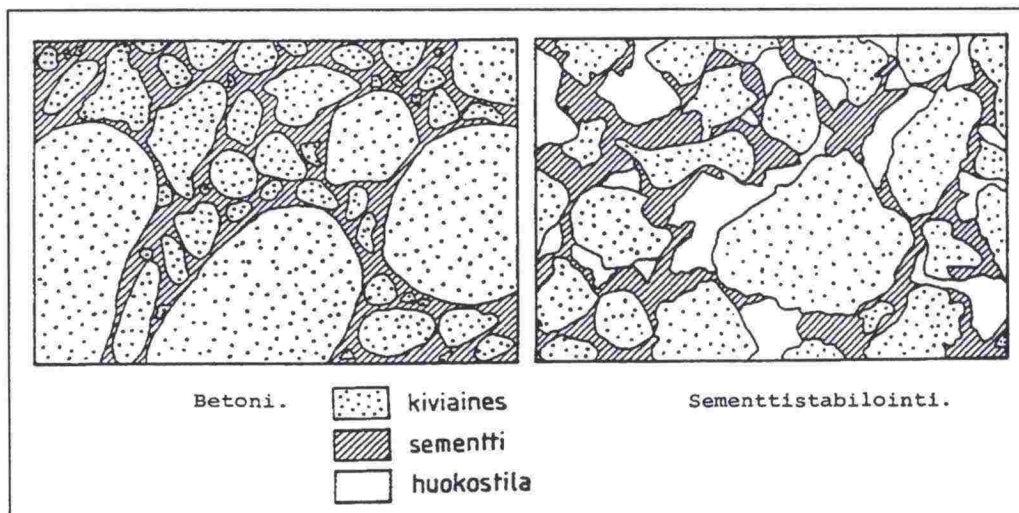
Suomen ilmasto-olosuhteissa materiaalit altistuvat tierakenteessa vuosittain toistuville jäätymis-sulamissykleille. Jäätymis-sulamiskokeita on käytetty viime vuosina ainoastaan muutamissa tutkimuksissa ja materiaaleina tällöin ovat olleet pääasiassa moreenimurskeet. Jäätymis-sulamiskokeiden ensisijaisena tarkoituksena on ollut selvittää hydraulisilla sideaineilla sidotun rakenteen kykyä vastustaa rapautumista. Pakkasrasituksen todellista vaikutusta tierakenteessa määritykset kuvaavat enintään tyydyttävästi. Koestusmenetelmiä ja olosuhteita tulisi kehittää myös siten, että ne kuvaisivat lujittumisen aikaisten olosuhdetekijöiden, kuten esim. lämpötilavaihtelujen vaikutusta varhaislujuuteen sekä rakenteen pitkäaikaista lujuus- ja muodonmuutokäyttäytymistä. Kokeiden tulisi olla sekä pakkasrasituksen laadullisia vaikutuksia kuvaavia helposti suoritettavia nopeita indeksikokeita että ilmiön kvantitatiivista vaikutusta arvioivia nopeutettuja mallikokeita.

## 2 SEMENTTISTABILOINNIN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

### 2.1 Yleistä

Sementtistabilointi eroaa betonista siten, että stabiloinnissa sementtipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin betonissa ja lujitettava maa-aines ei yleensä ole betonisoran kaltaista suhteistunutta kiviainesta. Stabiloinnissa ei siten saada aikaan täydellistä tiivistymistä ja tyhjätillaa jää 10 - 15 %, mikä on noin kymmenkertainen normaaliin betoniin verrattuna. / 20, 24/.

Sementin lisäys pienentää kosteuden ja lämpötilan vaikutusta maa-ainekseen. Sementtistabiloidun maa-aineksen vesieroosion kestävyys paranee, lujuus roudan sulamisen aikana kasvaa ja routivuus vähenee tai estyy kokonaan. Lisäksi kiviaineksen käsiteltävyys ja tiivistettävyyden paranee. Varsinainen tunnusmerkki on kuitenkin sementin lisäyksellä aikaansaatu pysyvä lujuuden kasvu. Lujuus perustuu siihen, että kiviaineksen sisältämä vesi muodostaa yhdessä sementin kanssa sementtiliiman, joka kovettuaan sitoo kiviaineksen rakeet toisiinsa. Lujuus on sitä suurempi, mitä enemmän rakeiden välisiä sidoksia syntyy. Mitä tiiviimmäksi massa tiivistetään, sitä enemmän sidoksia syntyy. Sementtistabiloitu maamassa ei tiivisty täydellisesti ja massa jää ilmahuokosia, joita sementtiliima ei täytä. Tällöin sementtiliima ei kokonaan peitä kiviainesta ja rakeet sitoutuvat toisiinsa pistemäisesti (Kuva 1). / 20, 24/.



Kuva 1: Betonin ja sementtistabiloinnin rakenteet / 20/.

Sementtistabiloidun maan lujuus on pieni betoniin verrattuna. Toisin kuin betonilla, jonka lujuus perustuu sementtikiven lujuuteen, stabiloidun maan lujuus perustuu sementin aiheuttaman sisäisen kitkakulman ja koheesion kasvuun maarakeiden välillä. Sementtistabiloitu rakenne ei myöskään ole



betonin kaltainen jäykkä rakenne, vaan lähes taipuisa. Taipuisuus johtuu stabiloituun rakenteeseen syntyvistä hiushalkeamista. / 20, 21/.

## 2.2 Kemialliset tekijät

Lujuuteen vaikuttavia kemiallisia tekijöitä ovat mm. runkoaineen hienoaineksen kemiallinen koostumus ja orgaanisen aineksen määrä. Lisäksi runkoaineessa esiintyvät sulfaatit, sulfiitit ja stabiloidun maan huokosissa oleva hiiliidioksidi voivat sopivissa olosuhteissa alentaa stabiloidun maan lujuutta. Kalsiumkarbonaatin esiintyminen runkoaineessa yleensä parantaa stabiloidun maan lujuutta. / 30/.

Sora- ja hiekkalajitteet muodostavat suurimman osan useimmista stabiloitavista maalajeista. Pienen ominaispinta-alansa vuoksi niillä ei kuitenkaan ole kemiallista vaikutusta stabiloituun maahan. Osassa stabiloitavia maita hienoaineksen kemiallisella koostumuksella on vaikutusta stabiloinnin lujuuteen. / 30/.

Orgaanista ainesta on merkittävässä määrin vain pintamaissa. Humus on orgaanisten ainesten, lähinnä kasvien, mätänemistuote, joka muuttuu jatkuvasti mm. bakteerien ja sienien vaikutuksesta. Humuksessa olevat hydroksyyliyhdykset reagoivat sementin kalsiumionien kanssa, jonka seurauksena seoksen pH-arvo pienenee ja sementtipartikkelien päälle saostuu kalvo, joka pienentää hydratoitumista. Joissain tapauksissa orgaaninen aines voi jopa kokonaan estää stabiloidun maan lujittumisen. Arvioitaessa orgaanisen aineen vaikutusta on laatu määrää tärkeämpi, sillä kaikki orgaaninen aines ei ole haitaksi hydrataatiolle. Se, miten paljon humus vaikuttaa sementin hydratoitumiseen, riippuu humuksen aktiivisuudesta. Yhdisteet, joilla on suuri molekyylipaino (mm. selluloosa, tärkkelys ja ligniini), alentavat hyvin vähän puristuslujuutta. Sitävastoin yhdisteet, joilla on pieni molekyylipaino (mm. nukleiinihappo, rypälesokeri ja viinihappo), alentavat selvästi maabetonin puristuslujuutta. Humuksen vaikutusta voidaan estää sekoittamalla maahan ylimääräisiä kalsiumioneja ennen sementin sekoitusta, jolloin humuksen hydroksyylihapot reagoivat ja humus neutraloituu. Kalsiumia voidaan lisätä maahan joko kalkkina tai kalsiumkloridina. Jos stabiloitavan maan pH-arvo on yli 7, on pieni humusmäärä vaaraton, sillä maassa on tällöin riittävästi kalsiumioneja neutraloimaan humuksen. / 20, 21, 30/.

Myös runkoaineessa mahdollisesti esiintyvät sulfaatit voivat olla haitallisia. Sulfaattien haitallisuus riippuu veden määrästä. Stabilointimassan valmistuksessa käytettävä vesimäärä ei vielä riitä liuottamaan sulfaatteja, mutta jos vettä on ylimäärin, voivat sulfaatit alkaa liueta. Reagoidessaan hydratoituneen sementin kanssa, ne muodostavat yhdisteitä, joiden tilavuus on reagoivien aineiden alkuperäistä tilavuutta suurempi. Seurauksena voi olla lujuuden heikkeneminen sekä tilavuuden kasvu. / 30/.



Sulfaattien lisäksi maassa voi esiintyä myös sulfiitteja pyriitin ( $\text{FeS}_2$ ) muodossa. Sulfiitteja on usein myös rikastusjätteissä ja teollisuuden sivutuotteissa. Pyriitti sinänsä ei ole sementtistabiloinnille vahingollista, mutta joutessaan kosketuksiin ilman kanssa, se voi hapettua sulfaateiksi, jotka edelleen reagoivat veden kanssa yllä kuvatulla tavalla. / 30/.

Stabiloidun maan huokosissa hiilidioksidipitoisuus voi olla huomattavasti normaalisti ilmassa olevia pitoisuuksia suurempi, mikä todennäköisesti johtuu orgaanisten aineiden mätänemisestä maassa. Karbonatisoitumista esiintyy, kun hiilidioksidi reagoi hydrataatiotuotteiden kanssa. Seurauksena voi olla lujuuden aleneminen ja plastisuuden lisääntyminen. Karbonatisoitumista ei kuitenkaan pidetä vakavana ongelmana ja se on minimoitavissa huolellisella jälkihoidolla sekä käyttämällä kestäviä runkomateriaaleja. / 30/.

Kalsiumkarbonaatin esiintymisestä stabiloitavassa maalajissa on yleensä hyötyä sementtistabiloinnille. Hyöty johtuu osin siitä, että maassa mahdollisesti esiintyvä orgaaninen aines on täysin kyllästetty kalsiumioneilla, jolloin se ei enää reagoi sementin kanssa, ja osin siitä, että liian kalkkipitoisessa maassa eivät kasvit yleensä viihdy, joten haitallista orgaanista materiaalia ei pääse syntymään. / 30/.

### 2.3 Fysikaaliset tekijät

Sementtistabiloinnin lujuuteen vaikuttavat tärkeimmät fysikaaliset tekijät ovat stabilointimassan tiiviysaste ja vesipitoisuus, sideaineen sekä stabiloitavan materiaalin hienoaineksen määrä ja mahdolliset lisäaineet / 30/.

Tiiviysaste vaikuttaa ratkaisevasti stabiloidun maamassan lujuuteen. Tiivistettäessä maata rakeet painuvat toisiaan vasten, jolloin kosketuskohdissa rakeiden väliin jäävä sementtiliimakerros sitoo kovettuessaan rakeet toisiinsa. Mitä paremmin maa tiivistetään, sitä suurempi on rakeiden välisten tartuntakohtien pinta-ala. Tiivistäminen ja rakeisuuden paraneminen kasvattavat myös kitkakulmaa ja koheesiota. Koheesio kasvaa edelleen sementin sitoutuessa. / 20, 21/.

Sementtistabiloinnin puristuslujuuden riippuvuus tiheydestä logaritmisella asteikolla on lähes aina lineaarinen suora (Kuva 2), jonka yhtälö voidaan esittää muodossa / 30/:

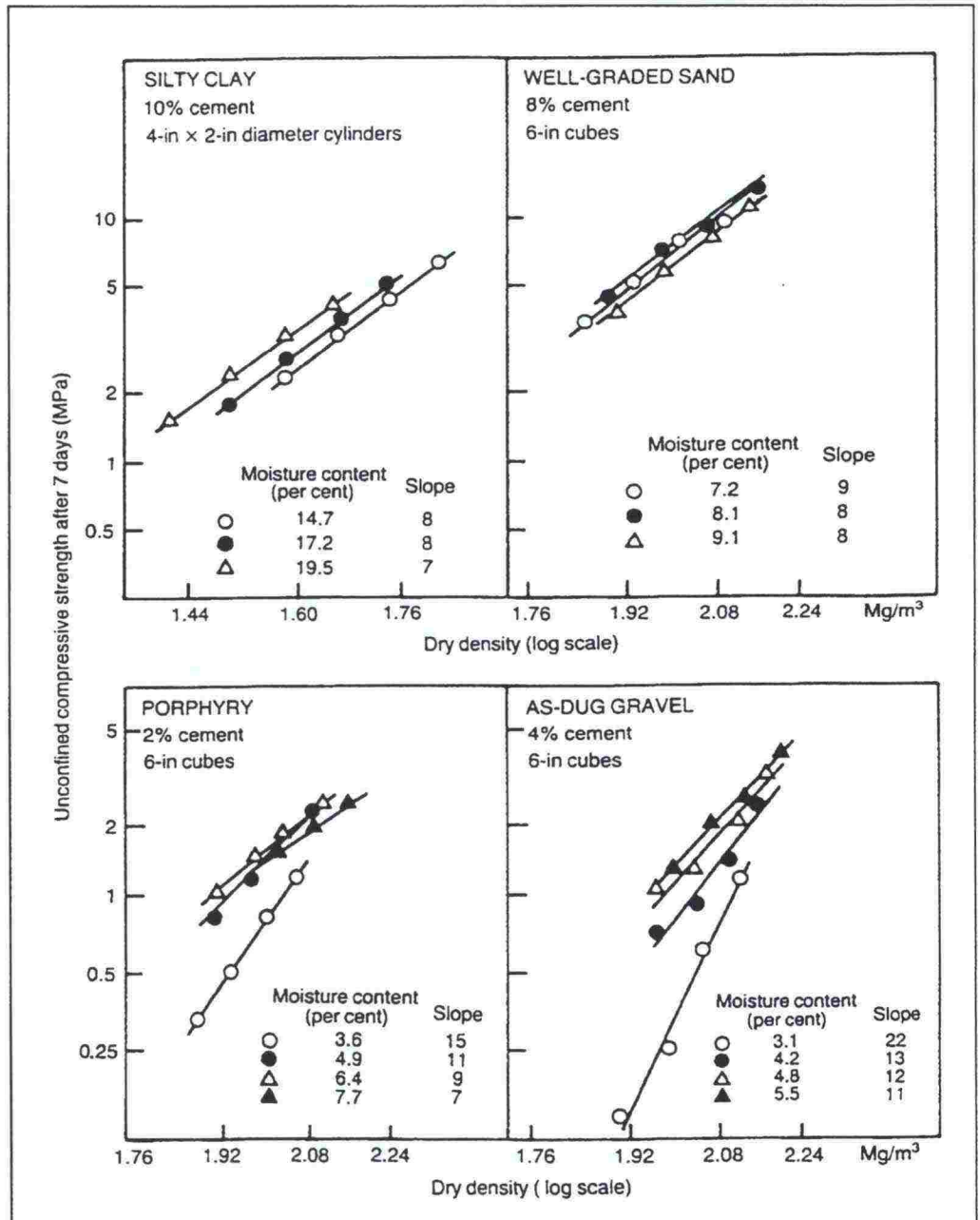
$$\log S = \log K + n \log D \quad (1)$$

$$\text{tai } S = KD \quad (2)$$

missä S on lujuus  
D on tiheys  
K on vakio  
n on vakio.

## SEMENTTISTABILOINNIN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

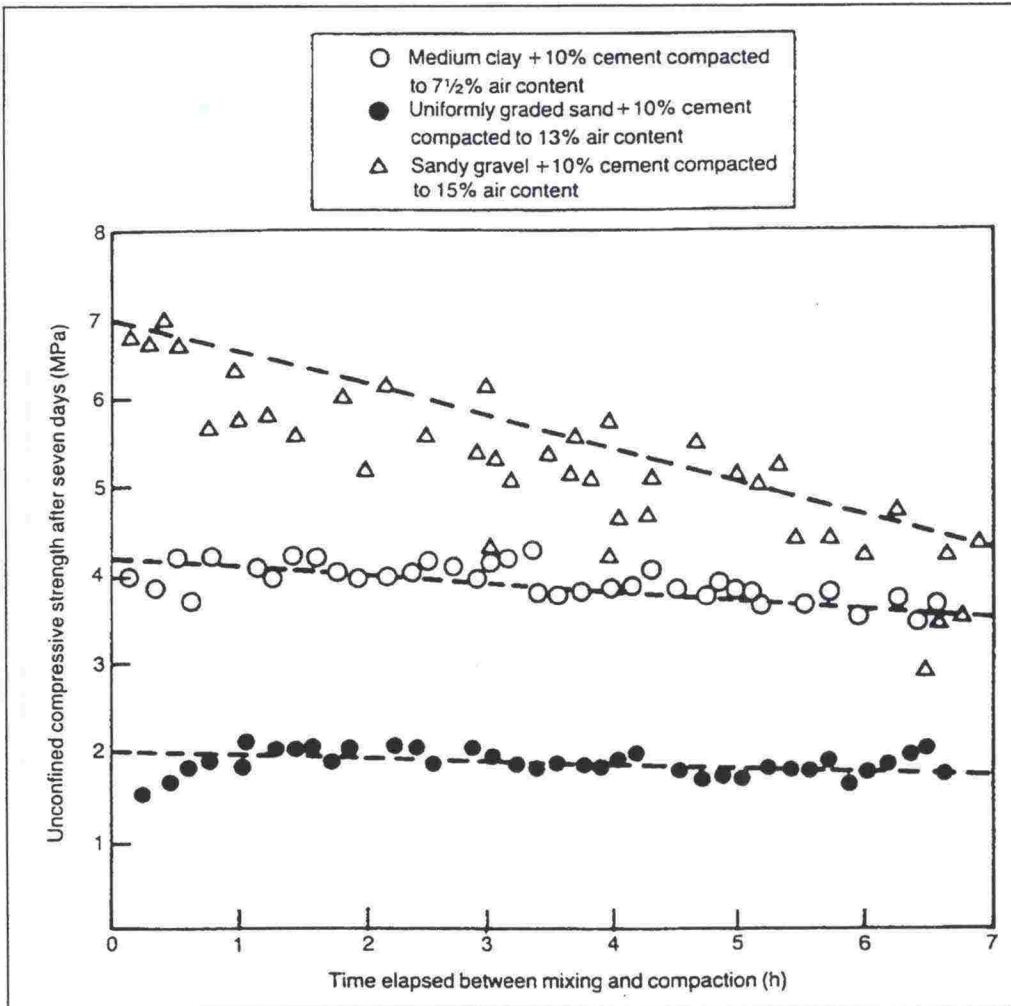
Vakio  $n$  on vesipitoisuuden funktio, joka pienenee vesipitoisuuden kasvaessa. Yhden prosentin lisäys tiheydessä kasvattaa lujuutta keskimäärin 10 prosenttia. / 30/.



Kuva 2: 7 vrk:n puristuslujuuden riippuvuus kuivatiheydestä erityyppisillä stabiloiduilla materiaaleilla eri vesipitoisuuksilla (logaritminen asteikko)/ 30/.

Sementti alkaa hydratoitua ja muodostaa sidoksia välittömästi veden lisäyksen jälkeen. Stabilointimassaa tiivistettäessä jo muodostuneet sidokset rikkoutuvat ja niiden muodostama osuus stabiloinnin lujuudesta häviää. Tämän vuoksi massan tiivistäminen tulisi suorittaa mahdollisimman nopeasti sekoituksen jälkeen. Useimmissa ohjeissa suositellaan tiivistys tehtäväksi kahden tunnin kuluessa stabilointimassan sekoituksesta. Kuvassa 3 on esitetty se-

koituksen ja tiivistyksen välisen ajan pituuden vaikutusta puristuslujuuteen. Tiheys on materiaaliikohtaisesti vakio. / 30/.



Kuva 3: Vakiokuivatiheyteen tiivistettyjen koekappaleiden puristuslujuuden riippuvuus sekoituksen ja tiivistyksen välisestä ajasta / 30/.

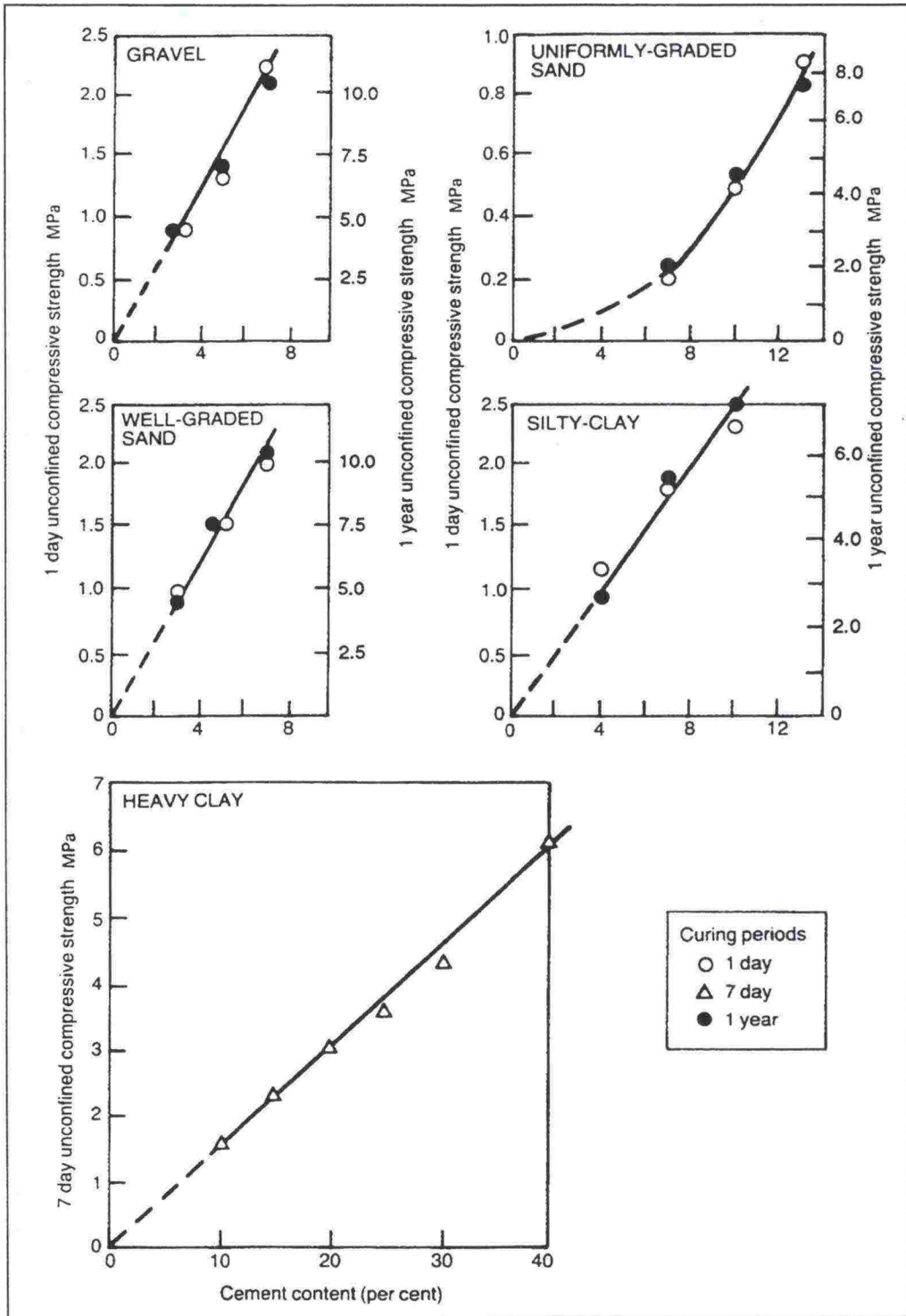
Sementtistabiloinnissa vesipitoisuus vaikuttaa sekä tiivistettävyyteen että sementin hydrataatioon. Jos vesipitoisuus on liian suuri, tiivistämisessä ei päästä haluttuun tulokseen. Tällöin veden poistuessa huokostila jää suureksi ja rakeiden kosketuskohtien pinta-ala pieneksi. Sementti tarvitsee täydelliseen hydratoitumiseen n. 20 % painostaan vettä. Suurilla vesipitoisuuksilla riittävä vedensaanti ei ole ongelma, mutta alhaisilla vesipitoisuuksilla sementin on kilpailtava vedestä runkoaineen kanssa. Jos runkoaineen vedenimukyky on suuri, voi sillä olla suurempi yhtymistaipumus veden kanssa kuin sementillä, jolloin sementti ei saa riittävästi vettä täydelliseen hydratoitumiseen. Parhaimmat lujuudet saavutetaan yleensä suorittamalla tiivistys stabilointimassan optimivesipitoisuudessa, jolloin materiaalin kuivatiheys saavuttaa maksimiarvonsa. Yleensä vesimäärä on tällöin riittävä takaamaan sementin hydratoitumisen. / 20, 21, 30/.



Jotta sideaineen käyttö olisi mahdollisimman tehokasta, sen tulisi levittyä tasaisesti stabiloitavaan materiaaliin. Rakeisilla materiaaleilla sideaineen sekoittaminen on suhteellisen helppoa ja se levittyy tasaisesti materiaaliin. Suuri savimäärä vaikeuttaa veden ja sementin sekoittamista maahan ja lisää sekoittamiseen tarvittavaa työmäärää. Lisäksi koheesiomaalajeilla on huomattavasti suurempi ominaispinta-ala kuin sementillä, joten karkeampi sideaine ei pysty peittämään kiviainesta eikä sitomaan rakeita toisiinsa. Tästä syystä sementtistabiloinnilla saavutettava lujuuden lisäys jää koheesiomaalajeilla hyvin pieneksi. Sementtistabiloinnin puristuslujuus kasvaa kiviaineksen maksimiraekoon kasvaessa. Suurimmat puristuslujuudet saadaan, kun maalajin rakeisuuskäyrä on lähellä tiiveimmän pakkauksen käyrää ts. rakeisuus on sellainen, jolla saavutetaan suurin irtotiheys tiivistetyssä seoksessa. Myös maalajin hienoainespitoisuudella on optimi. Hienoainemäärän muutokset optimipitoisuudesta alentavat puristuslujuutta. / 20, 21, 30/.

Sementtipitoisuuden kasvaessa kasvaa stabiloidun maa-aineksen puristuslujuus lähes lineaarisesti (*Kuva 4*). Karkearakeisissa maissa lujuuden kasvu on nopeampaa. Poikkeuksena tästä on tasarakeinen materiaali, jossa pienet sementtimäärät täyttävät huokosia fillerin tavoin, ja vasta, kun rakeisuus on parantunut riittävästi, muuttuu puristuslujuuden kasvu lineaariseksi. Myös vetolujuus suurenee sementtipitoisuuden kasvaessa. Vetolujuuden kasvun seurauksena kutistumisesta johtuvia halkeamia syntyy vähemmän, mutta ne ovat suurempia. Rakenteellisesti tiheässä olevat pienet halkeamat, joista ei ole vaaraa rakenteen kestokyvyille, ovat parempia kuin harvemmassa olevat suuremmat halkeamat. Stabilointi vaikuttaa myös pienentämällä maalajin plastisuutta. Sementtistabiloidun maan Poissonluku vaihtelee 0,23...0,31 ja on sitä suurempi, mitä enemmän hienoainesta maa sisältää. Sementin lisääminen myös parantaa maan routakestävyyttä ja pienentää vedenläpäisevyyttä. / 20, 21, 30/.





Kuva 4: Puristuslujuuden riippuvuus sementtipitoisuudesta eri maalajeilla/ 30/.

Sementtistabiloinnissa voidaan käyttää lisäaineita mm. humuksen neutra-loimiseen, hydratoitumisen nopeuttamiseen tai hidastamiseen, hienojen tai tasarakeisten maaalajien stabilointiin sekä stabilointikustannusten alentami-seen. Hidastimia voidaan käyttää pidentämään stabilointimassan sekoituk-sen ja tiivistyksen välistä aikaa. Yleensä hidastimia käytetään vain poikkeus-tapauksissa. Lujitettaessa runsaasti hienoainesta sisältävää maalajia voi-daan hienoainespartikkelit yrittää saada kasautumaan erilaisilla lisäaineilla.

Lisäaineiden avulla voidaan säädellä myös jo lujitetun kerroksen vesipitoisuutta. / 20, 21, 30/.

## 2.4 Ulkoiset tekijät

Sementtistabiloinnin lujuuteen vaikuttavista ulkoisista tekijöistä tärkeimmät ovat hydratoitumisen aikainen lämpötila sekä ulkoinen vedensaanti / 30/.

Hydratoitumisen aikaisen lämpötilan kasvu nopeuttaa sementtistabiloinnin lujuudenkehitystä lähes lineaarisesti. Lineaarisuus ei kuitenkaan päde pozzolaanisille materiaaleille, joiden lujuus korkeissa lämpötiloissa kasvaa odotettua enemmän pozzolaanisten reaktioiden kiihtyessä lämpötilan nousun myötä. / 30/.

Routanousua voi esiintyä lämpötilan ollessa hieman nollan alapuolella, kun pohjaveden pinnasta pääsee imeytymään vettä yläpuoliseen jäätyvään kerrokseen, johon muodostuu jäälinsskejä. Veden imeytymisen jatkuessa jäälinssit laajenevat edelleen aiheuttaen rakenteeseen huomattavaakin tilavuudenkasvua. Yleensä pieni sementinlisäys riittää tekemään materiaalin routimattomaksi, eivätkä sementtistabiloidut materiaalit ole herkkiä routimiselle. Tämän arvellaan johtuvan alentuneesta vedenläpäisevyydestä hydrataatio- tuotteiden täyttäessä rakeiden välisen huokostilan. / 30/.

Sitomattomissa ja heikosti sidotuissa rakenteissa, joita ei ole suojattu jäätymiseltä, voi myös materiaalihuokosiin jäätyvä vesi laajetessaan pirstoa rakennetta. Mikäli vettä on huokosissa riittävästi, vaurio voi ulottua jopa kymmenien senttien syvyydelle. Vaurioitumisriskiä voidaan pienentää huolellisella tiivistyksellä ja vesieristyksellä. / 30/. Sementtistabilointia ei pitäisi suorittaa alle +5 °C:n lämpötilassa / 28/.

Lämpölaajenemisesta ja kutistumisesta johtuvaa halkeilua esiintyy myös sementtistabiloiduilla materiaaleilla, kun lämpötilan muutoksesta aiheutuvat jännitykset ylittävät vetolujuuden murtojännityksen. Koheesiomaalajeilla halkeilua aiheuttaa myös vesipitoisuuden alenemisestä aiheutuva kutistuminen, jota kuitenkin voidaan sementin lisäyksellä vähentää. / 30/.

### 3 SEMENTTISTABILOINTI ERI MAISSA

#### 3.1 Terminologia

Tielaitoksen sementtistabilointiohjeessa / 28/ määritellään sementtistabilointikäsitteet laiha maabetoni, maabetoni, sementtisepelys ja jyräbetoni. Maabetonia käytetään tierakenteessa kantavaan ja jakavaan kerrokseen. Laiha maabetoni eroa maabetonista siten, että siihen käytetään sementtiä vähemmän kuin maabetoniin. Laiha maabetoni sopii suodatinkerrokseen sekä pengertäytteeseen.

Jyräbetonia käytetään kantavassa kulutuskerroksessa. Jyräbetonin sementtipitoisuus on noin 2-3 -kertainen maabetoniin verrattuna. Sementtisepelyksellä tarkoitetaan sementtiliimalla sidottua sepelikerrosta. Sementtisepelyksessä käytettävä sementtipitoisuus on noin kaksinkertainen maabetoniin verrattuna. / 28/.

Sementtistabilointia koskeva terminologia vaihtelee eri maiden välillä, mikä aiheuttaa helposti sekaannuksia ja vaikeuttaa vertailua eri maiden välillä. Seuraavassa esitetty Englannin ja USA:n käytäntö kattaa terminologian osalta myös useiden muiden maiden määritelmät. Sementtistabiloinnin käyttötarkoitus ja mitoituskriteerit määritellään kussakin maassa erikseen.

BSI (British Standards Institution) jakaa sementtistabiloinnit neljään luokkaan. Aiemmin käytössä olleiden termien *soil-cement*, *cement bound granular material* ja *lean concrete* tilalle on otettu termit CBM1, CBM2 ja CBM3. CBM1 on stabiloinnin "kevein" muoto. CBM1 voidaan valmistaa joko paikalla- tai asemasekoitusmenetelmällä ja sitä käytetään alusrakenteen parantamiseen sekä tien jakavaan ja kevyemmin liikennöidyillä teillä myös kantavaan kerrokseen. CBM2 valmistetaan aina asemasekoituksena, mutta muilta osin se voidaan käsittää CBM1:n vahvemmaksi muodoksi, jonka runkoaineena käytetään kallio- tai soramursketta. CBM2:ta käytetään tien päällysrakennekerroksissa kuten CBM1:tä. CBM3 on korkealuokkaista sementtistabilointia, jota käytetään raskaasti liikennöityjen teiden kantavaan kerrokseen. CBM4 on uusi luokka, joka eroaa CBM3:sta vain korkeamman lujuusvaatimuksensa perusteella. / 16, 37/.

USA:ssa käytetään yleisimmin PCA:n (Portland Cement Association) määrittelemiä käsitteitä *soil-cement* ja *cement-modified soil*. Osavaltioissa on paikallisesti käytössä myös muita termejä. Termi *soil-cement* tarkoittaa hyvin tiivistettyä maamateriaalin, sementin ja veden seosta, joka sementin hydratoituessa muodostaa lujan ja kestäväan materiaalin. Erona BS:n ja PCA:n termeillä on, että BS:n *soil-cement* tarkoittaa hienorakeisen materiaalin stabilointia, kun taas sama PCA:n termi tarkoittaa stabiloitua materiaalia yleensä. Termejä *cement-treated base* ja *cement-treated-aggregate base* käytetään termin *soil-cement* rinnalla, kun tarkoitetaan tien stabiloitua kanta-



vaa kerrosta. Yleisemmässä mielessä termiä *cement-treated* käytetään useissa maissa kuvaamaan kaikkia materiaaleja, joihin on lisätty sementtiä. / 33, 37/.

*Cement-modified soil* on pienellä sementinlisäyksellä aikaansaatu uutta lujittumatonta tai puolilujaa materiaalia, jonka kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat olennaisesti entistä parempia. Se, kuinka paljon ominaisuudet paranevat, riippuu maamateriaalista ja sementin määrästä. Käsittely voidaan tehdä sekä karkea- että hienorakeisille maille, päämääränä on vähentää pohjamaan plastisuutta ja muodonmuutoksia tai lisätä kantavuutta. / 37/.

Em. termien lisäksi PCA käyttää myös termiä *econocrete*. Ulkonäöltään ja työstettävyydeltään *econocrete* on tavallisen betonipäällysteen kaltainen. / 37/.

Eurooppalainen standardisoimiskomitea CEN (European Committee for Standardization), jonka tavoitteena on luoda jäsenvaltioilleen yhtenäinen eurooppalainen standardijärjestelmä, käyttää termiä *cement bound granular material* (CBGM), joka tarkoittaa sementillä sidottua materiaalia, joka täyttää annetut rakeisuusvaatimukset. CEN jakaa normiluonnoksessa / 15/ sementillä sidotut materiaalit puristuslujuuden perusteella seitsemään luokkaan (CB 1 - CB 7) sekä vetolujuuden ja kimmomoduulin perusteella kuuteen luokkaan (CB 1 (TE) - CB 6 (TE)). Luokittelutavat ovat toisistaan riippumattomia, eivätkä eri tavoin määritetyt lujuusluokat vastaa toisiaan.

## 3.2 Materiaalivaatimukset

### 3.2.1 Runkoaineet

Stabilointia käytetään tienrakentamisessa ympäri maailmaa. Materiaalit ja menetelmät vaihtelevat olosuhteista, vaatimuksista ja tavoitteiden erilaisuudesta riippuen. Teollistuneissa maissa hyvälaatuisten materiaalien käyttöä rajoittavat lähinnä ympäristölliset näkökohdat sekä tarve käyttää maata viljelykseen. Vähemmän kehittyneissä maissa sekä syrjäisillä alueilla hyvän ja tasalaatuisen runkoaineen saatavuus voi olla taloudellisista syistä rajoitettua. Molemmissa tapauksissa heikkolaatuisemman sinänsä tienrakennukseen kelpaamattoman materiaalin ominaisuuksien parantaminen stabiloimalla on usein taloudellisesti kannattavin ratkaisu. Yleensä tällaisissa tapauksissa runkoaineena on edullisinta käyttää tietyömaalta tai sen läheisyydestä saatavia materiaaleja. / 30/.

Laatuvaatimukset täyttäviä materiaaleja käytetään sementtistabiloinnin runkoaineena raskaasti liikennöidyillä teillä, kun halutaan saada aikaan säänkestävä ja kantavuudeltaan hyvä kerros, jolla on hyvä vastustuskyky väsymistä vastaan. Sidotuilla kerroksilla lisätään myös rakenteen jäykkyyttä, jol-





Kantavassa kulutuskerroksessa käytettävä jyräbetoni tehdään 0-16...25 mm kiviaineksesta asemasekoitteisena. Sementtisepellykseen käytetään kahdenlaista lajitetta. Sementtisepellys valmistetaan täyttämällä sepelin (# 32-65 mm) sekaan sementtiliimaa, jonka kiviaines on 0-4 mm. / 28/.

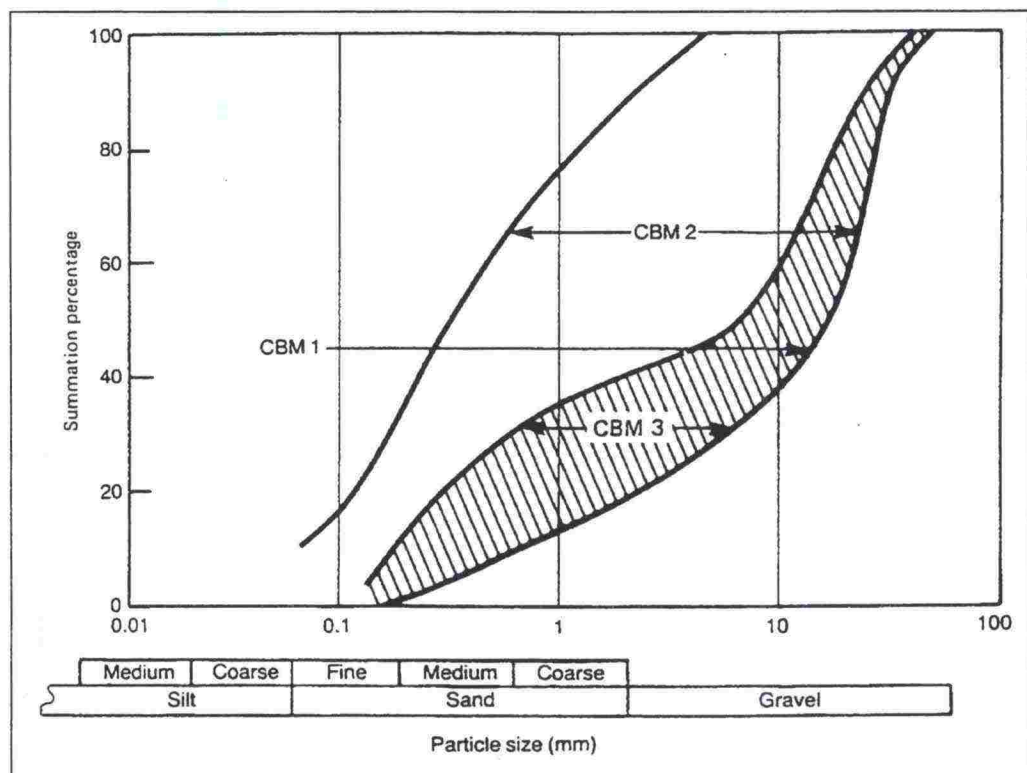
BS määrittelee runkoaineet kullekin stabilointityypille. CBM1:een kuuluvat taulukossa 1 esitettyä raekokojakaumaa hienorakeisemmat materiaalit. CBM1:n rakeisuusalue on esitetty myös kuvassa 6. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että lisäksi materiaalin raesuhteen  $d_{60}/d_{10}$  on oltava vähintään 5 sekä # 0,425 mm seulan läpäisevän materiaalin juoksuraja korkeintaan 45 % ja kieritysraja korkeintaan 20 %, jotta stabilointi olisi taloudellisesti kannattavaa. Käytännössä plastisuusvaatimukset estävät ainoastaan raskaiden savien käytön sementtistabiloinnin runkoaineena. CBM2:n runkoaineena käytettävän kallio- ja soramurskeen rakeisuusvaatimukset on esitetty taulukossa 1 ja kuvassa 6. CBM3:n ja CBM4:n runkoaineena käytetään laadultaan betonisoraa vastaavaa kiviainesta tai kuonaa, jonka rakeisuusvaatimukset on esitetty taulukossa 1 sekä kuvassa 6. / 16, 30, 37/.

*Taulukko 1: Sementtistabiloinnin runkoaineen rakeisuusvaatimukset läpäisy-%:eina BS:n mukaan / 16/.*

BS seulakoko (mm)	CBM1	CBM2	CBM 3/4 maksimi raekoko	
			40 mm	20 mm
50	100	100	100	-
37,5	95	95-100	95-100	100
20	45	45-100	45-80	95-100
10	35	35-100	-	-
5	25	25-100	25-50	35-55
0,6	8	15-90	8-30	10-35
0,3	5	8-65	-	-
0,150	-	5-40	0-8*	0-8*
0,075	0	0-10	-	-

\* 0-10 kalliomurskeen hienoainekselle.





Kuva 6: CBM1:n, CBM2:n ja CBM3/4:n rakeisuusalueet BS:n mukaan / 30/.

PCA:n *soil-cement*:in runkoaineena voidaan käyttää sekä hieno- että karkearakeisia luonnonmateriaaleja, kierrätys- ja jättemateriaaleja sekä teollisuuden sivutuotteita kuten kuonia, tuhkia, murskauslaitosten jätekiviä ja uudelleen käytettäviä tien kerrosmateriaaleja (murskeet ja sorat). Kantavassa kerroksessa runkoaineena käytetään hyvälaatuisia murskeita ja soria. Suositeltavat raekokojakaumat (*soil-cement* ja *cement-treated-aggregate base*) on esitetty taulukossa 2. Lisäksi CTAB:n runkoaineen plastisuusluvun tulisi olla korkeintaan 10. *Econocrete*:n runkoaineena käytetään paikallisia kiviaineksia tai kierrätettyjä päällysrakennemateriaaleja, jotka eivät välttämättä täytä betonisoran laatuvaatimuksia. / 33/.

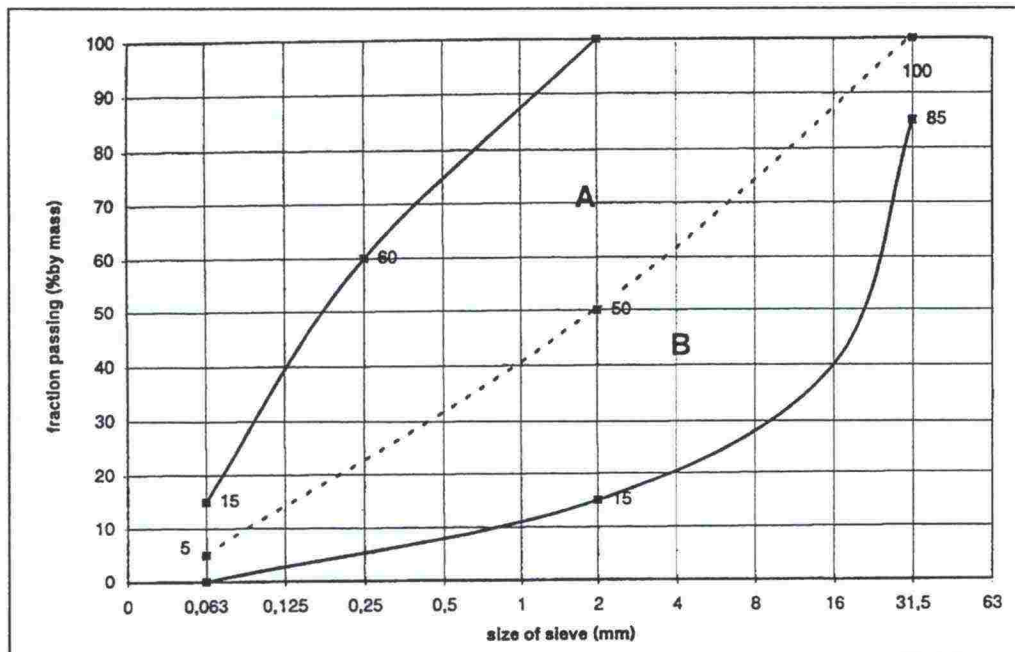
Taulukko 2: *Soil-cement*:in ja *cement-treated-aggregate base*:n suositeltavat raekokojakaumat läpäisy-%:eina PCA:n mukaan / 33/.

Seulakoko (mm)	<i>Soil-cement</i>	<i>Cement-treated-aggregate base</i>
50	100	100
4,75	> 55	55-90
2,0	> 37	37-67
0,075		0-30

CEN-normiluonnoksen / 15/ mukainen sementtistabiloinnin runkoaineen rakeisuusalue on esitetty kuvassa 7. Alueelle A kuuluvat tiivistettävissä olevat hiekat, jotka riittävän korkeaa sementtipitoisuutta käytettäessä kestävät liikenne- ja pakkasrasitusta. Alueelle B kuuluvat rakeisuudeltaan hyvät karkeat kiviainekset, joiden hienoainespitoisuus on rajoitettu. Runkoaineena voidaan käyttää murskattua tai murskaamatonta luonnon- tai keinotekoista



kiviainesta, teollisuuden sivutuotteita, kierrätettyä rakennuskiviainesta tai näiden yhdistelmiä.



Kuva 7: CEN-normiluonnoksen / 15/ mukainen sementtistabiloinnin runkoaineen rakeisuusalue.

Eräissä maissa korostuu kiviaineksen laadun merkitys. Esimerkiksi Ranskassa, jossa suurin sallittu akselikuorma on 13 t, liikenne päästetään viivytyksettä vasta rakennetulle tielle. Koska stabilointi ei näin lyhyessä ajassa ehdi lujittua, siirtyy alkuvaiheessa koko kuormitus ainoastaan runkoaineen välityksellä alemmille kerroksille. Jotta rakenne ei tällöin särkyisi, on kiviainekselle asetettu tarkat laatuvaatimukset koskien murskaantuneiden rakeiden määrää sekä kiviaineksen lujuutta ja puhtautta. Myös Venäjällä painotetaan kiviaineksen kuormituskestävyyttä siinä vaiheessa, kun sideaine ei vielä ole sitoutunut riittävästi. / 37/. Hollannissa stabiloidaan pääasiassa hiekkaa, jonka tulee olla kosteuden- ja pakkasenkestävää sekä humuksetonta / 17/.

### 3.2.2 Sideaineet

Sementtistabiloinnin sideaineena käytetään tavallisimmin portlandsementtiä tai sementtiä, jossa on mukana lentotuhkaa tai masuunikuonaa / 37/. Sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan on syytä käyttää portlandsementtiä, mikäli kiviaineksessa humuksen määrä on suuri.

Portlandsementtiä valmistetaan maailmanlaajuisesti ja sen ominaisuudet määritellään useissa kansallisissa standardeissa / 30/. Suomessa rakennussementit jaetaan SFS 3165 -standardin mukaan neljään tyyppiin klinkkerin ja seosaineiden suhteesta riippuen. Portlandsementiksi kutsutaan sementtiä, joka sisältää portlandklinkkeriä ja yhteensä enintään 5 % seosainei-

ta laskettuna klinkkerin ja seosaineiden yhteisestä määrästä. Muissa sementtityypeissä seosaineiden määrä on suurempi. / 34/.

Joutuessaan kosketuksiin veden kanssa portlandsementin sisältämät siliikaatit ja alumiinat alkavat hydratoitua ja muodostaa lujaa sementtikiveä, joka sitoo runkoaineen rakeet toisiinsa. Hydrataatioreaktio on hidas ja se alkaa sementtirakeiden pinnalta, jolloin sementtirakeiden keskus voi jopa jäädä hydratoitumatta. Hydrataatioreaktio hidastuu ajan myötä, mistä johtuen myös sementillä stabiloitujen materiaalien lujuuden kasvu hidastuu huomattavasti ajan myötä. / 30/.

Useissa maissa stabilointia suoritetaan myös erilaisilla sideaineseoksilla, jolloin kyseessä ei enää ole puhtaasti sementtistabilointi. Tällöin portlandsementin lisänä voidaan käyttää mm. kalkkia, masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Lähinnä seossementtien käyttö on kuitenkin koeluontoista ja poikkeuksellista. Systemaattisesti sementtiä, jossa on suuria määriä lentotuhkaa, pozzolaania tai kuonaa, käytetään vain Belgiassa, Espanjassa ja Ranskassa. Saksassa, Sveitsissä ja Ranskassa käytetään jonkin verran myös nopeasti kovettuvaa portlandsementtiä, kun stabiloitu kerros on otettava nopeasti liikenteen käyttöön. / 20, 29, 37/.

Sideainemäärä riippuu stabiloinnin tavoitteista ja käyttökohteesta. Yleensä tien jakavan ja kantavan kerroksen stabiloinnissa käytettävä sementtipitoisuus vaihtelee 4 - 8 %:iin kiviaineksen kuivapainosta. Alaraja varmistaa pakkasenkestävyyden, kun taas ylisuuret sementtipitoisuudet ovat paitsi kalliita, myös johtavat lisääntyvään kutistumishalkeiluun. Tällöin kiviaineksen rakeisuuden parantaminen on yleensä edullisempaa kuin suuren sementtimäärän käyttö. / 24/.

### 3.2.3 Vesi

Tielaitoksen Sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan stabilointiin käytettävä vesi ei yleensä saa sisältää klorideja enempää kuin 0,03 painoprosenttia (Cl-). Meriveden käyttö on kuitenkin sallittua. Humuspitoisia pintavesiä ei saa käyttää. Yleensä maabetonin halkeilutaipumus on sitä pienempää, mitä pienemmällä vesimäärällä tullaan toimeen. Hydratoitumisreaktioiden edistämiseksi maa-aineksessa tulisi olla vettä lähes maa-aineksen optimivesipitoisuuden verran. Puhdas sementti tarvitsee vettä n. 20 painoprosenttia hydratoituaan täydellisesti / 34/. Stabiloinnissa sementti joutuu kilpailemaan vedestä runkoaineen kanssa, jolloin veden tarve on suurempi. Sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan maabetonin vesisementtisuhteen tulisi olla 0,7-1,0.

### 3.3 Stabilointimassan kelpoisuusvaatimukset ja testimenetelmät

#### 3.3.1 Puristuslujuus

Yleisimmin sementtistabiloitujen materiaalien laatua arvioidaan riittävästi kovettuneelle materiaalille tehtävien lujuustestien perusteella. Lujuutta voidaan testata usealla eri tavalla, joista yksiaksiaalisella puristuskokeella määritetty puristuslujuus on yleisimmin käytetty. Puristuskoe on suhteellisen yksinkertainen suorittaa, joten se sopii hyvin rutiinitestiksi jokapäiväiseen käyttöön. Useimmissa maissa sementtistabiloinnin laadunvarmistus perustuukin puristuslujuuteen joko kokonaan tai muiden testien kanssa yhdessä käytettynä. Testin soveltuvuutta tienrakennuksen laadunvarmistukseen on myös kritisoitu, koska testi ei millään tavoin jäljittele rakennekerroksen todellista jännitystilaa tierakenteessa. / 30/.

Puristuskokeessa käytetään sekä sylinterimäisiä että kuutiomaisia koekappaleita. Koekappaleet valmistetaan sekoittamalla runkoaineeseen tietty määrä vettä ja sementtiä, jonka jälkeen massa tiivistetään muottiin joko haluttuun tilavuuspainoon tai halutulla työmäärällä. Koekappaleen koko riippuu käytettävän runkoaineen maksimiraekoosta siten, että maksimiraekoon suhde koekappaleen pienimpään dimensioon tulisi olla mahdollisimman pieni. / 30/. Eri maissa käytettäviä puristuskoekappaleita ja niiden valmistusta on esitetty taulukossa 3. Saksalaista ohjetta TP HGT käytetään materiaalien ja rakentamisen laadun osalta ohjetta TP BF tiukemmat vaatimukset täyttävän sidotun kantavan kerroksen tutkimiseen / 27/.



Taulukko 3: Puristuskoekappaleet ja niiden valmistus eri maissa / 6, 8, 28, 29, 30, 31, 35, 36, 37/.

Maa ja nor- mi/ohje	Koekappaleen muoto ja koko (mm)	Maksimi- raekoko (mm)	Vesipitoisuus (pp par. proctorkoe np norm. proctorkoe)	Tiivistystapa ja tiiviyssaste
<b>Suomi</b>				
Sementti- stabilointiohje	sylinteri, koko riippuu maksimi- raekoosta	16 tai 32	$w_{opt}/pp^*$	-sullonta runkoai- neen pp-tiiviyteen
<b>Saksa</b>				
TP BF	d=100, h=120 d=150, h=125	20 31,5	välillä $w_{opt} \pm 2\%/np^{**}$	-np-sullonta stab. massan np-tiiviyteen
TP HGT	d=150, h=125	31,5	$0,9w_{opy}/np^{**}$	-tärypöydällä tai np- sullonnalla stab. massan np-tiiviyteen
<b>U.K.</b>				
BS 1924	d=50, h=100 150x150x150 <sup>***</sup>		$w_{opt} + 1\%$	-täryvasaralla (300- 400 N) maksimitiiviy- teen 3 kerroksessa, 1 min/krs
<b>USA</b>				
ASTM D 559	d=101.6, h=116.4	ei määr. <sup>****</sup>	$w_{opt}/np^{**}$	-np-sullonnalla <sup>*****</sup> stab. massan np- tiiviyteen
ASTM D 1632	d=71, h=142	ei määr. <sup>****</sup>	$w_{opt}/np^{**}$	-aluksi terässauvalla, lopuksi staatt. tai dyn. kuormalla stab. massan np-tiiviyteen
<b>Sveitsi</b>				
SN 640 509 a	d=101.6, h=117	16	$w_{opt}/np^{**}$	-np-sullonnalla <sup>*****</sup> stab. massan np- tiiviyteen
<b>Hollanti</b>	d=100, h=100	hiekkaa	$w_{opt} - 2\%$	-proctorsullonta

\* Määrittäminen runkoaineesta

\*\* Määrittäminen stab. massasta.

\*\*\* Hieno- ja keskirakeisille materiaaleille käyt. molempia muotteja, karkearakeisille kuutiota.

\*\*\*\* 19 mm suuremmat rakeet korvataan samanpainoisella määrällä lajitetta 4,75...19 mm.

\*\*\*\*\* ASTM-normeissa ei mainita np-koetta, mutta menetelmä noudattaa np-koetta.

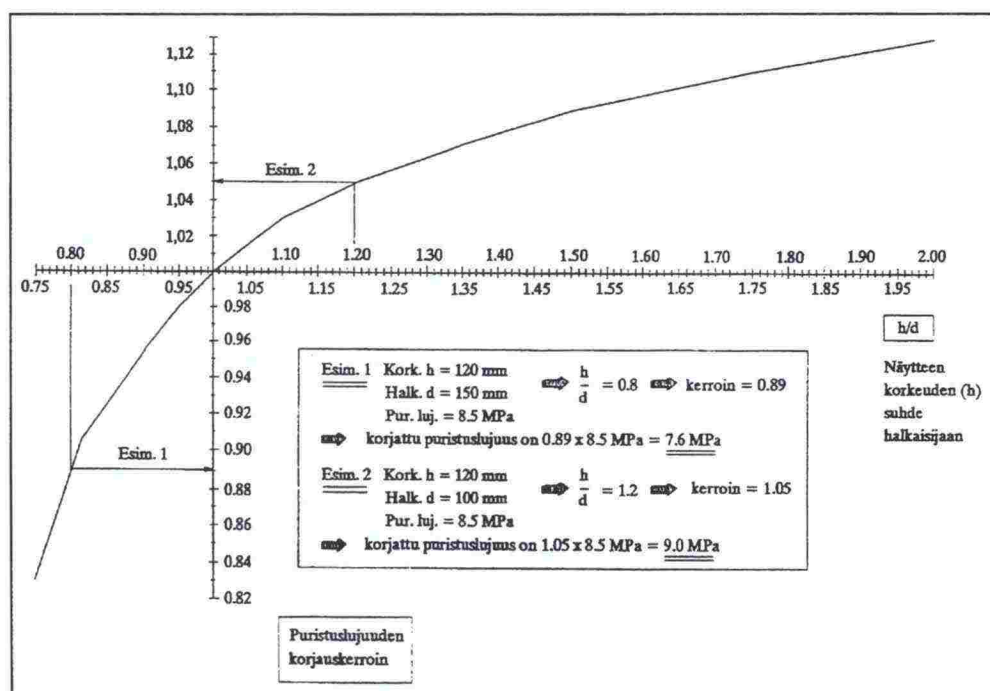
Eri muotoisista koekappaleista saadut puristuslujuudet eivät ole suoraan vertailtavissa keskenään. Kuutiomaiset koekappaleet antavat suurempia lujuuksia kuin sylinterimäiset. Lisäksi sylinterikappaleet, joiden h/d-suhde on 2:1, ovat lujuudeltaan heikompia kuin h/d-suhteeltaan 1:1 olevat sylinterimäiset kappaleet. Taulukossa 4 on esitetty puristuslujuuden korjauskertoimia eri muotoisille koekappaleille verrattuna 150 mm kuution lujuuksiin. Kertoimet ovat voimassa sementtistabiloinnille tyypillisellä suhteellisen alhaisella lujuustasolla. Tarkkoja kertoimia eri muotoisten kappaleiden lujuuksien

välille on mahdotonta antaa, koska lujuuksien suhde riippuu ensisijassa materiaalin lujuustasosta. / 30/.

Taulukko 4: Eri kokoisten ja muotoisten koekappaleiden puristuslujuuksien korjausker-toimia / 30/.

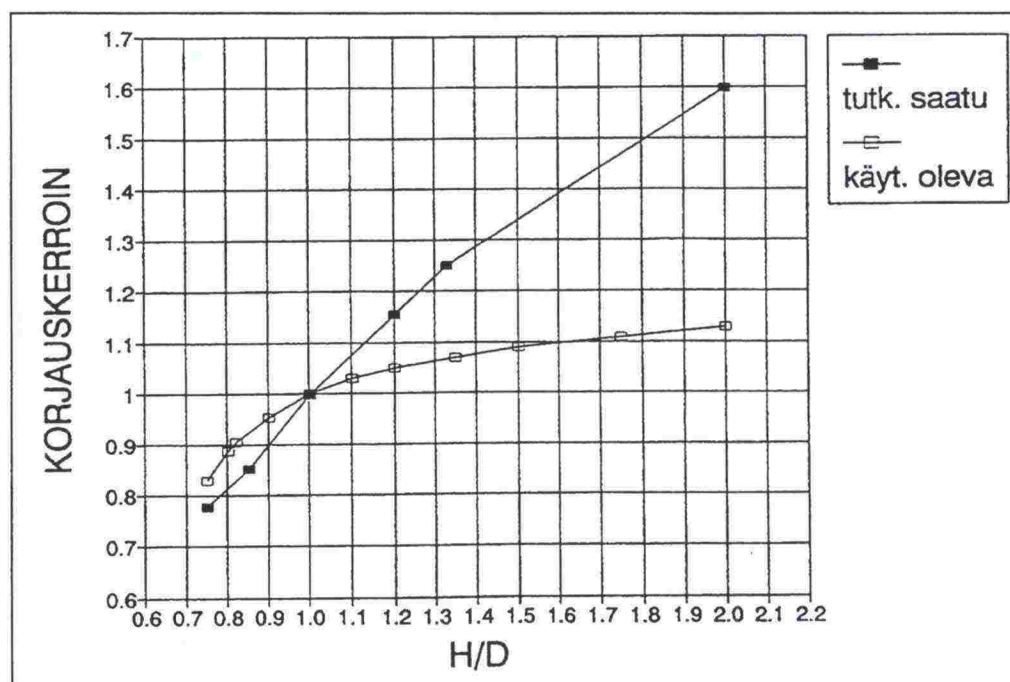
Koekappale	Korjauskerroin 150 mm kuutiolajuuteen
150 mm kuutio	1,00
100 mm kuutio	0,96
d x h = 100 x 200 mm sylinteri	1,25
d x h = 105 x 115,5 mm sylinteri	1,04
d x h = 152 x 127 mm sylinteri	0,96

Tielaitoksen sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan halkaisijaltaan ja korkeudeltaan eri muotoisten sylinterikoekappaleiden puristuslujuudet korjataan kuvan 8 käyrästä saatavalla korjauskertoimella.



Kuva 8: Puristuslujuuden korjauskertoimet sylinterimäisille koekappaleille Tielaitoksen sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan.

Selvityksessä / 4/ saatu puristuslujuuden korjauskäyrä poikkeaa tielaitoksen ohjekäyrästä huomattavasti. Korjauskäyriä on vertailtu kuvassa 9.



Kuva 9: Selvityksessä / 4/ saatu puristuslujuuden korjauskäyrä verrattuna tielaitoksen käyttämään korjauskäyrään.

CEN normiluonnoksen N 180 E / 12/ mukaan puristuslujuus voidaan määrittää halkaisijaltaan 50, 100, 150 tai 160 mm olevasta sylinterimäisestä koekappaleesta, jonka h/d-suhde on välillä 0,83...2. Vaihtoehtoisesti puristuslujuus voidaan määrittää myös 150 x 150 x 150 mm kuutiosta. Koekappaleen pienimmän dimension tulee olla vähintään 4,5-kertainen käytettävän runkoaineen maksimiraekokoon verrattuna. Puristuskokeessa suurin mahdollinen raekoko on 31,5 mm.

Koekappaleen muodon ja valmistuksen lisäksi myös lujittumisaika ja -olosuhteet sekä kokeen suoritustapa vaihtelevat eri maiden välillä (Taulukko 5). Em. tekijät vaikuttavat myös lujuuteen ja vaikeuttavat osaltaan vertailua tulosten välillä. Yleisimmin koekappaleet koestetaan 7 tai 28 vrk:n iässä, mutta muunkin ikäisiä koekappaleita käytetään. Lujittumisen aikaisista säilytystavoista tavallisin on pitää koekappaleet huoneenlämmössä haihtumiselta suojattuna. Muutamissa maissa koekappaleet upotetaan veteen ennen koestamista. Puristusnopeus vaikuttaa huomattavasti puristuskokeen tuloksiin. Puristusnopeus voidaan määrittää joko siirtymän, puristusvoiman tai -kuormituksen lisäyksenä aikayksikköä kohden.



Taulukko 5: Puristuskoekappaleiden lujittumisolosuhteet, koestaminen ja puristuslujuusvaatimukset eri maissa / 9, 17, 26, 28, 30, 31, 35, 36, 37/.

Maa ja nor- mi/ohje	Säilytysolosuhteet (sk suht. ilmankos- teus)	Koestus -ikä (d)	Puristus- nopeus	Lujuus- vaatimus (MPa)	Huom.
<b>Suomi</b>					
Sementti- stabilointiohje	+19...21°C, sk 90%, haihtumisel- tä suojattuna	7	2,5 kN/s	2...4* 3...4* 5...6 (6...8)*	suodatin, penger jakava kantava koekpl:iden päät tas. sahaamalla tai tasoitteella
<b>Saksa</b>					
TP BF	+20±2°C, sk≥95%, ennen koestusta 1 d veteen upotettu- na	7 tai 28**	0,1 MPa/s		
TP HGT	+15...25°C yli 20 h muotissa peitetty- nä, sitten ristikolla +20±2°C, sk ≥95%	28	0,1 MPa/s	7...12*** 9...12***	kantava, asf. pääll. kantava, bet. pääll. vaatimuksia kivi- ainekselle
<b>U.K.</b>					
BS 1924 ja BS 1881	vakiokosteudessa  veteen upotettuna	7		4,5 (2,5)**** 7 (4,5)**** 10 (6,5)**** 15 (10)****	CBM1 CBM2 CBM3 CBM4
<b>USA</b>					
ASTM D 1633	kosteushuonees- sa, ennen koestusta 4 h veteen upotettuna				koekpl:iden päät tas. kipsilaastilla
<b>Sveitsi</b>					
SN 640 509 a	peitettynä huo- neenlämmössä, ennen koestusta 4 h veteen upotettu- na	7	1 mm/min	2	
<b>Itävalta</b>					
RVS 8.05.13	+20°C, sk 100%, ennen koestusta 4 h veteen upotettu- na	7		3...5***	jakava
<b>Hollanti</b>					
	+20°C	28		5	jakava, vaatimuk- sia kiviaineksel- le****
<b>Japani</b>					
	7 d jälkeen 1 d veteen upotettuna	7		0,7...1,3***** 3...4*****	jakava kantava

\* Lujuus 2 kappaleen ka, suluissa asemasekoitetun massan lujuusvaatimus.

\*\* 28 vrk, jos humuskoe punaisesta mustaan tai jos käytetään hitaasti lujittuvaa sementtiä.

\*\*\* Lujuus 3 kappaleen ka.

\*\*\*\* Lujuus 5 kappaleen ka, suluissa vaatimus alimmalle yksittäiselle arvolle.

\*\*\*\*\* Hiekka stabilointiin sopivaa, jos  $h \times d = 100 \times 100$  stab. koekappaleen (10 % sementtiä, 11 % vettä) 7 vrk:n puristuslujuus on vähintään 2 MPa.

\*\*\*\*\* Lujuutta lisättävä 10...20 %, jos savikokkareita.

CEN normiluonnosten mukaan puristuskoelempi on säilytettävä haihtumisel-  
seltä suojattuna, koekappaleen ikä on 28 d. Puristusnopeus riippuu koekap-  
paleen arvioidusta lujuudesta. Mikäli arvioitu puristuslujuus on alle 3 MPa,  
on puristusnopeuden oltava 0,01...0,05 MPa/s. Puristuslujuuden ollessa  
3...12 MPa on nopeus 0,05...0,20 MPa/s. Mikäli lujuus on yli 12 MPa, käyte-  
tään puristusnopeutena 0,20 MPa/s. Tielaitoksen stabilointiohjeen / 28/ mu-  
kainen puristusnopeus 2,5 kN/s vastaa halkaisijaltaan 100 mm koekappa-  
leella puristusnopeutta 0,32 MPa/s ja halkaisijaltaan 150 mm koekappaleella  
puristusnopeutta 0,14 MPa/s. 150 mm koekappaleella puristusnopeudet  
vastaavat sementtistabiloinnille tyypillisellä lujuusalueella hyvin toisiaan.  
Pienemmällä 100 mm koekappaleella tielaitoksen ohjeen mukainen puris-  
tusnopeus on jopa yli kuusinkertainen CEN- normiluonnoksen ohjearvoihin  
verrattuna. Puristuslujuusvaatimukset eri luokissa on esitetty taulukossa 6.  
Lujuus riippuu myös testattavan koekappaleen koosta. 100 mm sylinteriä tai  
kuutiota voidaan käyttää, jos stabilointimassan maksimiraekoko on 8 mm,  
150 mm koekappaleet soveltuvat kaikille massoille. / 12, 15/.

Taulukko 6: CEN-normiluonnoksen / 15/ mukaiset vaatimukset puristuslujuudelle eri  
stabilointiluokissa.

Lujuusluokka	28 d puristuslujuus (N/mm <sup>2</sup> )	
	Ominaislujuus $f_{ck}$	
	Sylinteri tai kuutio $h/d = 1,0$	Sylinteri $h/d = 2,0$
CB 1	2	1,5
CB 2	4	3
CB 3	6	5
CB 4	9	7
CB 5	13	10
CB 6	18	14
CB 7	24	19

### 3.3.2 Vetolujuus

Sementtistabiloidun materiaalin veto-ominaisuuksia voidaan määrittää veto-  
kokeella, halkaisukokeella ja taivutuskokeella. Kukin koe kuvaa materiaalin  
veto-ominaisuuksia, mutta eri menetelmät antavat erilaisen arvon vetolujuu-  
delle. Vetokokeen ajatellaan yleisesti antavan luotettavimman tuloksen.  
/ 18/.

### Vetokoe

Vetokoe suoritetaan vetämällä koekappaletta molemmista päistä, kunnes se murtuu. Vetolujuus määritetään murtohetkellä vallitsevasta vetovoimasta. Vetolujuuden mittauksessa ongelmana on mahdollinen tartuntalaitteiston aiheuttama koekappaleen vaurioituminen sekä kuormituksen kohdistaminen siten, ettei murtumista nopeuttavaa taivutusta pääse syntymään. Kun lisäksi kokeen suorittamiseen tarvitaan erillinen laitteisto, on vetokoe jäänyt lähinnä tutkimustarkoitukseen käytettäväksi työkaluksi. / 37/.

Englannissa 70-luvulla tehdyissä tutkimuksissa sementtistabiloinnin vetolujuutta mitattiin kolmentyyppisistä koekappaleista. Koekappaleiden mitat, valmistus ja käytetyt kuormitusnopeudet on esitetty taulukossa 7. Tutkimuksessa 1 koekappaleita kuormitettiin päätyihin kiinnitettyjen leukojen avulla, tutkimuksessa 2 kuormitus välittyi päätyihin liimattujen levyjen avulla. Bofingerin tutkimuksen (1971) tulokset on esitetty taulukossa 8. Johdonmukaisia eroja eri muotoisten koekappaleiden vetolujuuksissa ei ole havaittavissa. Suurin palkki (koe 3) vedettiin käyttämällä erityistä kuormitusjärjestelyä, jossa palkki kiinnittyy vetolaitteeseen kitkan avulla. / 18/. Tutkimuksessa havaittiin vetolujuuden olevan noin 1/10 prismakappaleiden puristuslujuudesta / 37/.

Taulukko 7: Englantilaisissa tutkimuksissa suoritettuja vetokokeita / 18/.

No.	Tutkija	Koekappaleen muoto	Koekappaleen koko (mm)	Koekappaleen valmistus	Kuormitusnopeus	Materiaali
1	Bofinger RLL, LR 365, 1970 RRL, LR 379, 1971	keskeltä ohennettu briketti	ohennus 25x25 pituus 76	staatt. tiivistys	0,76 mm/min tai 0,38 mm/min	CBM1
2	Bofinger RRL, LR 379, 1971	palkki	76x76x305	staatt. tiivistys	138 kN/m <sup>2</sup> /min	CBM1
3	Kolias ja Williams TRRL, SR 344, 1978	palkki	102x102x508	tiivistys täry- vasaralla	350 kN/m <sup>2</sup> /min	CBM1 ja CBM3

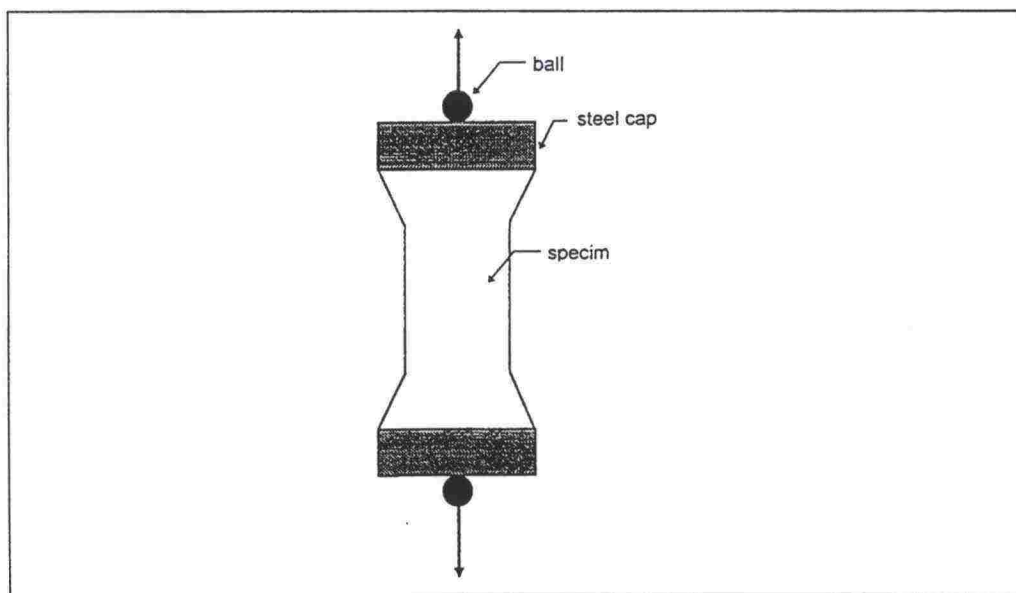


Taulukko 8: Lujuusominaisuuksien vertailu Bofingerin tutkimuksissa / 18/.

Sementti- pitoisuus (%)	Vesipi- toisuus (%)	Vetolujuus		Halkaisuvetolujuus		Taivutuslujuus	
		briketti (kN/m <sup>2</sup> )	palkki (kN/m <sup>2</sup> )	kumisui- kaleet (kN/m <sup>2</sup> )	ei kumisui- kaleita (kN/m <sup>2</sup> )	kimmoinen (kN/m <sup>2</sup> )	Herbert <sup>*</sup> (kN/m <sup>2</sup> )
6	15	269	245	-	-	404	278
8	15	358	360	-	-	491	383
10	15	418	428	-	-	664	485
6	17	373	332	304	271	463	336
8	17	398	418	367	303	630	432
10	17	480	400	405	366	758	543

\* Herbertin yhtälössä huomioidaan kuormituksen laatu ja materiaalin muodonmuutuskäyttäytyminen.

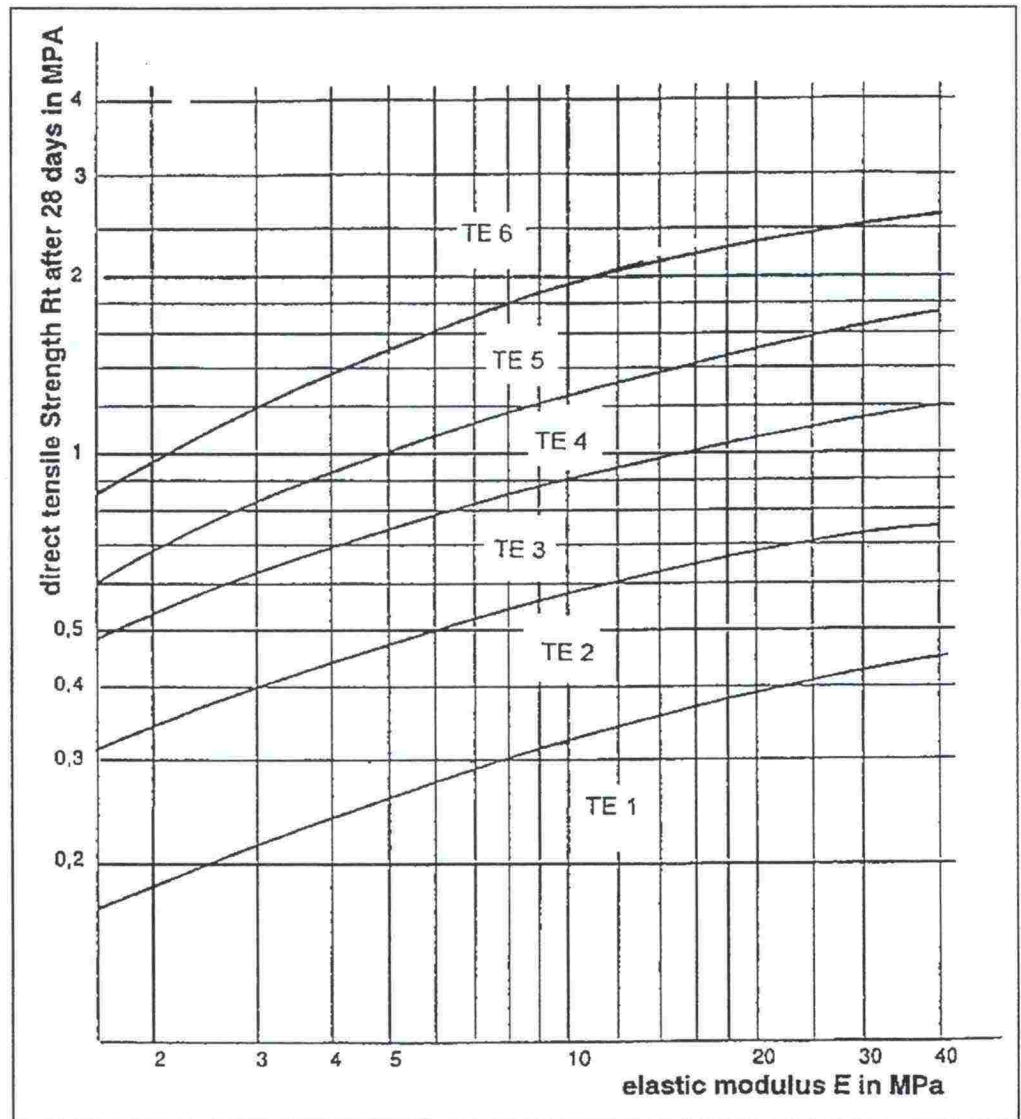
CEN-normiluonnoksen N 179 E / 11/ mukaan vetokoe tulisi suorittaa kuvan 10 mukaisesti koekappaleelle, jonka molempiin päihin on kiinnitetty vähintään 20 mm paksut teräslevyt. Koekappale valmistetaan tärytiivistämällä. Levyt kiinnitetään esim. epoksiliimalla. Vetovoima välitetään palloniveltä kautta, jotta koekappaleeseen ei syntyisi taivutusmomenttia. Kuormitusta lisätään tasaisesti nopeudella 0,001 MPa/s  $\pm$  0,0005 MPa. Liimauksen ja kokeen aikana koekappale on suojattava haihtumiselta esim. käärimällä kappaleet polyetyleenikalvoon tai märkään vaatteeseen. Koekappaleiden maksimiraekoko on 31,5 mm. Koe ei sovellu hienorakeisille materiaaleille eikä betonille.



Kuva 10: CEN-normiluonnoksen / 11/ mukainen vetokoekappale.

CEN-normiluonnoksen / 15/ mukaan sementtistabiloinnit jaetaan materiaalin vetolujuuden ja kimmomoduulin perusteella kuuteen luokkaan (TE 1 - TE 6) (Kuva 11). Vetolujuus ja kimmomoduuli määritetään vetokokeella normiehtotusten / 11/ ja / 10/ mukaisesti. Vaihtoehtoisesti vetolujuus voidaan määrit-

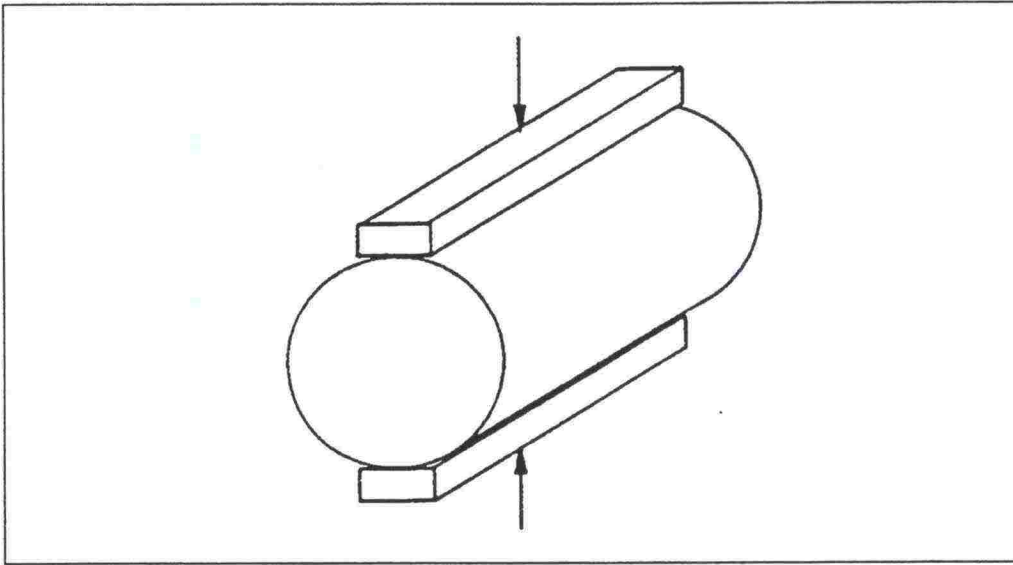
tää halkaisuvetokokeen avulla, jolloin vetolujuus arvioidaan olevan 80 % halkaisuvetolujuudesta.



Kuva 11: CEN-normiluonnoksen / 15/ mukainen stabilointiluokitus materiaalin vetolujuuden ja kimmomoduulin perusteella.

### Halkaisuvetokoe

Halkaisuvetokokeessa, jota kutsutaan myös Brasiliakokeeksi, vaakasuorassa olevan sylinterinmuotoisen koekappaleen vastakkaisille kyljille kohdistetaan pystysuora puristus-voima. Voima voidaan jakaa tasaisesti koko kappaleelle kuormitussuikaleiden (esim. kumia) välityksellä (Kuva 12). Halkaisuvetokokeesta saatava lujuus on karkeasti arvioiden sama kuin vetokokeella mitattu vetolujuus. Halkaisuvetokoe sopii myös rutiinitestiksi, sillä koe on suhteellisen helppo suorittaa. Taulukossa 9 on esitetty esimerkkejä tutkimuksissa käytetyistä koejärjestelyistä. Bofingerin tutkimustuloksista (Taulukko 8) näkyy selvästi kumisuikaleiden käytön vaikutus kuormituksen jakamisessa. / 18/.



Kuva 12: Halkaisuvetokoe / 18/.

Taulukko 9: Esimerkkejä tutkimuksissa käytetyistä halkaisuvetokokeista / 18/.

No.	Tutkija	Koekappaleen koko (mm)	Koekappaleen valmistus	Kuormitus- nopeus	Materiaali
1	Bofinger RRL, LR 365, 1970	d=102, h=51	staatt. tiivistys		CBM1
2	Cauley HRR, No. 422, 1973	d=152, h=203	kierrotiivistys	3,56 mm/min	sementtistab. sora ja kalkki- kivimurske
3	Gregg Etelä-Afrikka, 1967	d=52, h=104		1,27 mm/min	sementtistab. hieno hiekka

CEN-normiluonnoksen N 181 E / 13/ mukaan hydraulisesti sidotun materiaalin halkaisuveto-lujuus määritetään halkaisijaltaan 50, 100, 150 tai 160 mm sylinterimäisestä koekappaleesta, jonka h/d-suhde on välillä 0,8...2. Materiaalin maksimiraekoko on 31,5 mm ja koekappaleen pienimmän dimension tulee olla vähintään 4,5 kertaa suurin raekoko. Kuormituksen jakamiseen käytetään joko vanerista tai kovalevystä tehtyjä suikaleita. Suikaleiden tulee olla pituudeltaan vähintään koekappaleen mittaisia, leveydeltään 1/10 koekappaleen halkaisijasta ja paksuudeltaan  $4 \pm 1$  mm. Kuormitusta kasvatetaan tasaisesti nopeudella 0,001...0,030 MPa/s. Kuormitusnopeus valitaan siten, että kokeen kestoksi tulee n. 45...90 sekuntia.

### Taivutusvetokoe

Maabetonilaatan paksuus mitoitetaan taivutusvetolujuuden avulla. Taivutusvetolujuus määritetään palkin taivutuskokeesta, joka em. vetokokeita paremmin kuvaa päällysrakennekerroksen taipumista pyöräkuorman alla, vaikkakin todellisuudessa rakennekerros taipuu kahteen suuntaan. Taivutuskoe



on suhteellisen helppo ja nopea suorittaa, joten sitä käytetään puristuslujuuden lisäksi tienrakennuksen laadunvalvontaan ainakin Italiassa, Espanjassa ja Tsekkoslovakiassa. Taivutuskoe on määritetty myös ainakin Britannian, Ranskan ja USA:n normeissa. / 18, 29, 37/.

Taulukkoon 10 on koottu eri tutkimuksissa käytettyjä taivutusvetolujuuden määrittystapoja. Kaikissa tapauksissa on käytetty nelipistekuormitusta, joka on kuormitustavoista yleisin. Sementillä stabiloiduille materiaaleille suoritettujen tutkimusten mukaan palkin taivutuskokeesta saatu taivutusvetolujuus voi olla jopa kaksinkertainen vetolujuuteen tai halkaisuvetolujuuteen verrattuna. / 18/.

*Taulukko 10: Esimerkkejä tutkimuksissa käytetyistä taivutuskokeista / 18/.*

No.	Tutkija	Koekappaleen koko (mm)	Koekappaleen valmistus	Kuormitusnopeus	Materiaali
1	Bofinger RRL, LR 365, 1970	76x76x305	staatt. tiivistys		CBM1
2	Bofinger RRL, LR 379, 1971	75x150x600 100x150x600	leikataan rakenteesta		CBM1
3	Gregg Etelä-Afrikka, 1967	51x51x305		1,27 mm/min	sementtistab. hiekka
4	Kolias ja Williams TRRL, SR 344, 1987	102x102x508	tiivistys täryvaralla	BS 1881 (1970) mukaan	CBM1 ja CBM3
5	Otte ARRB, 1978	50x50x300 75x75x450 100x100x600			sementtistab. massat
6	Williams ja Patankar 1968	BS 1881 mukaan	tiivistys täryvaralla	BS 1881 mukaan	CBM3

ASTM:n taivutuskokeen / 8/ standardikoekappale on 76x76x290 mm palkki, mutta muunkin kokoisia kappaleita voidaan ohjeen mukaan koestaa. Tällöin koekappaleiden pituuden tulee olla vähintään 51 mm suurempi kuin 3x palkin syvyys. Maksimitiiviyteen tiivistettävät kappaleet valmistetaan tiivistämällä materiaali muottiin aluksi käsin, lopulliseen korkeuteen kappaleet tiivistetään staattisen kuormituksen avulla. Kovettumisen ajan koekappaleita säilytetään kosteushuoneessa. Ennen koestusta kuormituskohdat on tarvittaessa tasoitettava kipsillä. Kuormitus tapahtuu nelipistekuormituksena tasaisella nopeudella 0,02 mm/s. Hyväksyttävä tulos saadaan, jos murtuma tapahtuu keskimmaisessa kolmanneksessa tai korkeintaan 5 % sen ulkopuolella.

Vaikka tiedetään, että sementillä stabiloidun materiaalin kimmoominaisuudet ovat erilaiset vedossa ja puristuksessa, oletetaan taivutuslujuutta laskettaessa tavallisimmin materiaalilla olevan samanlainen kimmoimen käyttäytyminen molemmissa tilanteissa. Bofinger on käyttänyt tulosten laskentaan myös Herbertin yhtälöä, joka huomioi kuormituksen laadun ja materiaalin muodonmuutoskäyttäytymisen (*Taulukko 8*). / 18/.

### 3.3.3 CBR-koe

CBR -koe (California Bearing Ratio) on empiirinen testi, joka on kehitetty kuvaamaan pohjamaan lujuutta. Tutkittava materiaali tiivistetään CBR-muottiin, jonka halkaisija on 152 mm ja korkeus 127 mm. Kokeessa mitataan voima, joka tarvitaan työntämään Ø 49,65 mm mäntä näytteeseen tietyllä nopeudella. Mitattua voimaa verrataan vastaavaan standardimateriaalille määritettyyn arvoon. CBR-arvo on näiden voimien suhde prosentteina. Alunperin testi on tarkoitettu sitomattomille materiaaleille, joiden CBR-arvo on enimmillään 100. Sementillä stabiloidulla materiaalilla CBR-arvot ovat kuitenkin useimmiten yli 100, jolloin testin merkitys vähenee. Tästä syystä CBR-testi ei ole yleisesti käytetty tutkittaessa sementillä stabiloitujen materiaalien lujuutta. Sitä kuitenkin käytetään ainakin Japanissa, Britanniassa ja Etelä-Afrikassa. Japanissa CBR-koetta käytetään puristuskokeen ohella testattaessa jakavan kerroksen stabiloituja materiaaleja. Kokeessa 7 vrk:ta lujittuneiden ja 4 vrk:ta veteen upotettuina olleiden koekappaleiden CBR-arvon tulee olla 60 - 100 %. Britanniassa CBR-testi on standardisoitu (BS 1924: Part 2: 1990) ja sitä voidaan käyttää puristuskokeen sijaan suodatinkerroksen tai jakavan kerroksen hienorakeisten (hiekkä, siltti, savi) stabiloitujen materiaalien testaamisessa. Tavoitteena on tavallisimmin CBR-arvo 30-70 % 7 vrk:ta lujittuneelle materiaalille, mutta esim. suodatinkerrokselle minimivaatimus on 15 %. Testiolosuhteita ei ole määritelty. Etelä-Afrikan stabilointiohjeen (TRH 13: NITRR 1986) mukaan testiä on suositellaan käytettäväksi sementtistabiloiduille materiaaleille, joiden CBR-arvo on korkeintaan 150. / 16, 30, 37/.

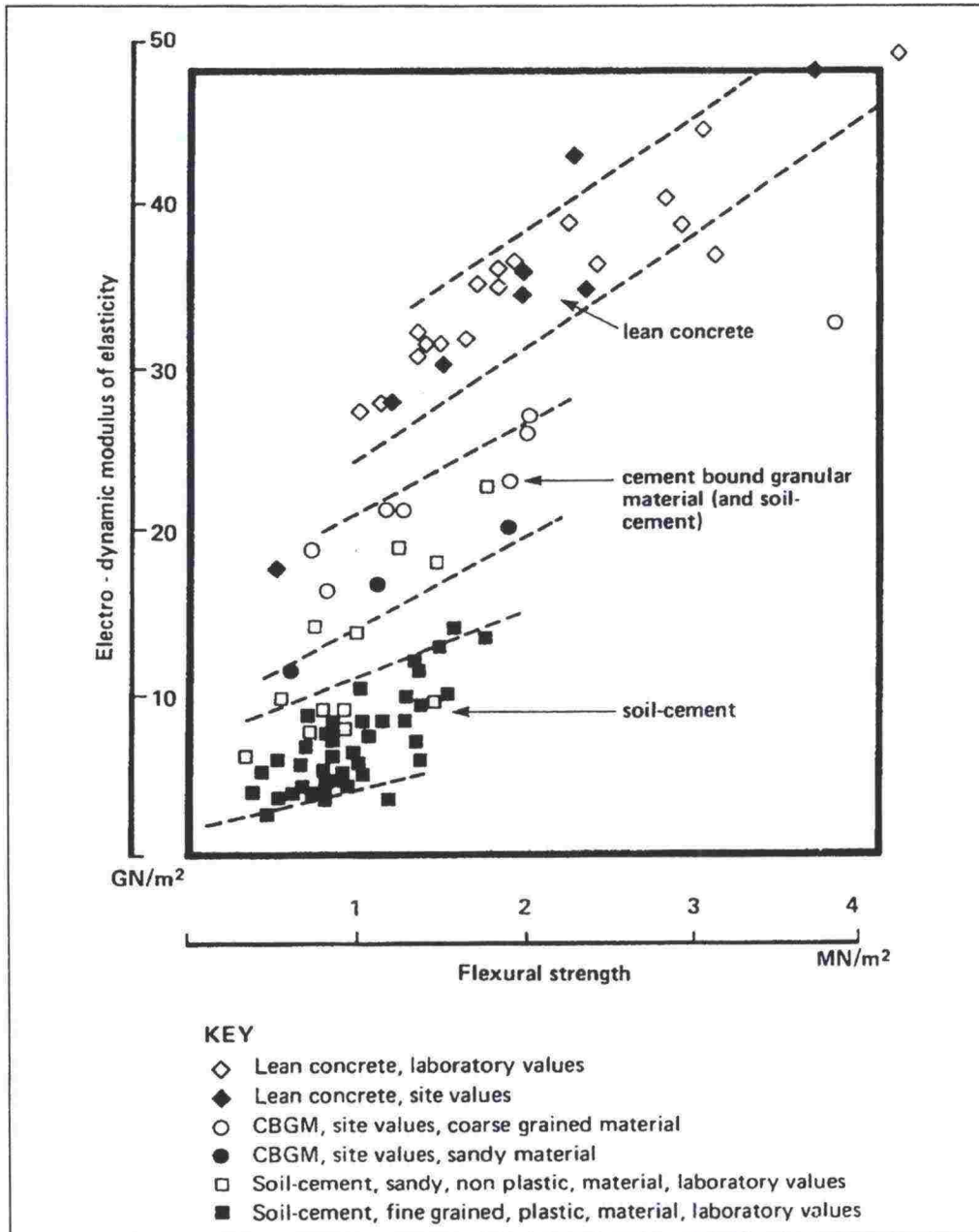
### 3.3.4 Muodonmuutosominaisuudet

Sementillä stabiloitujen materiaalien muodonmuutosominaisuuksia voidaan laboratoriossa määrittää yksi- tai kolmiaksaalikokeilla, taivutuskokeella, resonant-column -menetelmällä ja electro-dynamic -menetelmällä. Jännitysvenymsuhde ilmaistaan useimmissa testeissä E-moduulina, poikkeuksena ovat dynaaminen kolmiaksaalikoe sekä resonant-column -menetelmä, joiden tulokset ilmaistaan  $M_r$ - ja G-moduulina. Staattista E-moduulia määritettäessä materiaalin oletetaan olevan täysin kimmoinen, kun taas dynaamisen  $M_r$ -moduulin laskennassa huomioidaan myös muodonmuutoksen palautumaton osa. G-moduuli riippuu E-moduulista ja Poissonin luvusta  $\nu$ . / 18/.

Käytettävän menetelmän valinta riippuu testattavien materiaalien lujuudesta sekä maksimiraekoosta. Veto-, puristus- ja taivutuskoe sekä electrodynamic -menetelmä soveltuvat suurimmalle osalle stabiloiduista materiaaleista. Kolmiaksaalikoetta on käytetty sekä hieno- että karkearakeisille stabiloiduille materiaaleille. Resonant-column -menetelmä soveltuu vain hydraulisesti sidotuille hienorakeisille malajeille. Materiaalien maksimiraekoko vaikuttaa testattavien koekappaleiden kokoon. / 18/.

Yleensä vetomoduuli on pienempi kuin puristusmoduuli ja dynaaminen  $M_t$ -moduuli suurempi kuin staattinen E-moduuli. Koemenetelmän lisäksi kimmomoduulin arvoon vaikuttavat mm. kuormitustapa, kuormitusnopeus ja koekappaleen muoto. Kimmomoduulin arvo riippuu myös stabiloidun materiaalin koostumuksesta, sideainemäärästä, tiiviyydestä ja iästä. / 18/. Kuvassa 13 on esitetty erään tutkimuksen (Williams, 1972) tuloksena saatua erilaisen sementillä sidottujen materiaalien kimmomoduulin ja lujuuden suhdetta. Koska lujuudeltaan samanlaisten materiaalien kimmomoduuli vaihtelee huomattavasti eri stabilointityyppien välillä, ei materiaalien luokittelu yksinomaan lujuuden perusteella ole tienrakennuksen kannalta tarkoituksenmukaista. / 37/.





Kuva 13: Kimmomoduulin riippuvuus taivutusvetolujuudesta eri stabilointiluokilla / 37/.

BS:n mukaisille stabilointityypeille on ehdotettu käytettäväksi taulukon 11 mukaisia kimmomoduulin arvoja. Dynaaminen kimmomoduuli mitataan poikkileikkaukseltaan 150 x 150 mm palkista ja staattinen moduuli halkaisijaltaan 150 mm sylinteristä (BS 1881: Parts 121 and 203). Koska vielä ei ole selvää, mitä arvoa päällysrakenteen mitoituksessa tulisi käyttää, on toistaiseksi suositeltu dynaamisen ja staattisen moduulin keskiarvoa. / 16/. Tielaitoksen sementtistabilointiohjeen / 28/ mukaan kimmomoduulin arvona mitoituksessa käytetään laihalla maabetonilla 0,8 GPa, maabetonilla 2-4 GPa ja jyräbetonilla 10 GPa.

*Taulukko 11: Rakenteellisessa suunnittelussa käytettäväksi ehdotetut kimmomoduuliarvot sementillä stabiloiduille materiaaleille/ 16/.*

Materiaali	Kimmomoduuli (GPa)		
	Dynaaminen	Staattinen	Keskiarvo
CBM1			
-karkearak. maalajit	18	10	14
-silttiset maalajit $I_p < 10$	7	4	5
CBM2	23	13	18
CBM3	27	19	23
CBM4	30	23	27
Suodatinkerros			
-karkearak. maalajit	18	9	14
-silttinen maa $I_p < 10$	7	4	6
-savimaa $I_p > 10$	1	0	0,5

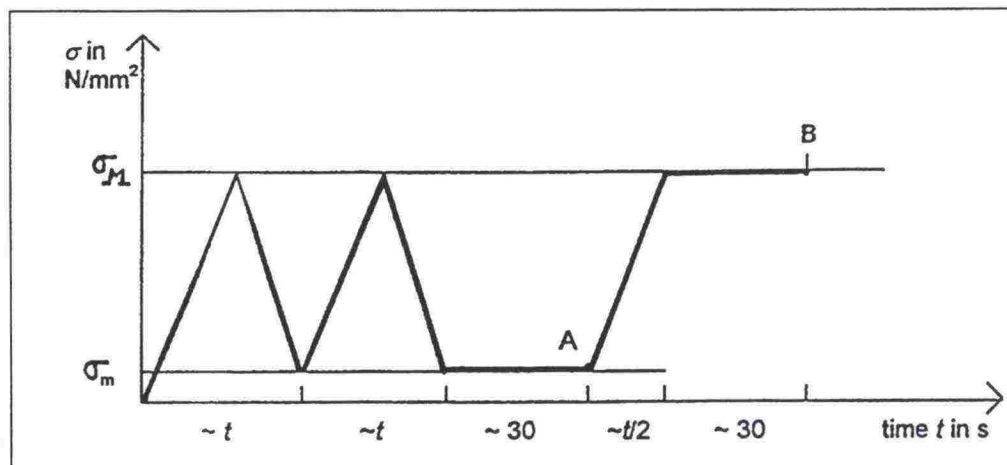
Huom!  $I_p$  on plastisuusluku.

CEN-normiehdotuksen N 169 E / 10/ mukaan hydraulisesti sidotun materiaalin (maksimiraekoko 31,5 mm) kimmomoduuli voidaan määrittää yksiaksaalisella puristus- tai vetokokeella. Käytettävän koekappaleen korkeuden tulee olla vähintään 4 x materiaalin maksimiraekoko, kuitenkin vähintään 30 mm. Halkaisija on vastaavasti vähintään 3x maksimiraekoko, minimimitan ollessa myös 30 mm. Siirtymän mittaus suoritetaan siirtymämittarilla tai ekstensometrillä.

Normiehdotuksessa / 10/ määritellään neljä erityyppistä koemenetelmää. Ensimmäisessä testi suoritetaan kasvattamalla ja vähentämällä puristuskuormitusta syklisesti jännitystasojen  $\sigma_m = 0,1R_c$  ja  $\sigma_M = 0,3R_c$  välillä (Kuva 14). (Yksiaksaalinen puristuslujuus  $R_c$  määritetään ennen koetta kolmen kappaleen keskiarvona.) Siirtymät vastaavilla jännitystasoilla mitataan kohdissa A ja B ( $\varepsilon_m$  ja  $\varepsilon_M$ ). E-moduulin arvo voidaan laskea yhtälön (1) avulla.

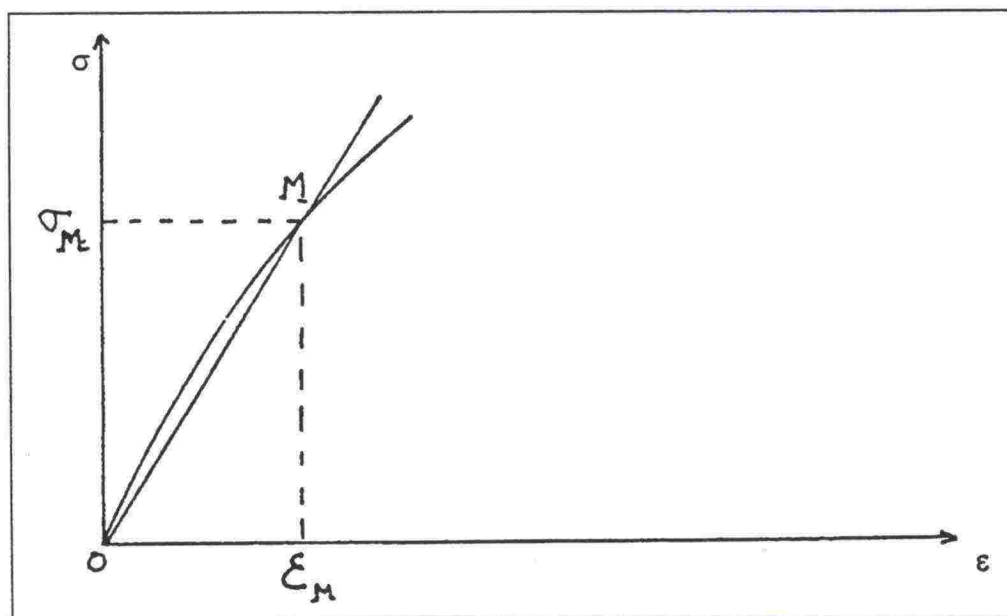
$$E = 10^3 \times (\sigma_M - \sigma_m) / (\varepsilon_M - \varepsilon_m) \quad (1)$$

missä E on kimmomoduuli (MPa)  
 $\sigma_M$  ja  $\sigma_m$  ovat puristuskuormituksen jännitystasot (MPa)  
 $\varepsilon_M$  ja  $\varepsilon_m$  ovat siirtymät vastaavilla jännitystasoilla kohdissa A ja B



Kuva 14: Kimmomoduulin määrittäminen syklisellä puristuskuormituksella CEN-normiluonnoksen / 10/ mukaan.

E-moduuli voidaan normiehdotuksen / 10/ mukaan määrittää myös kuvan 15 mukaisesti puristus- tai vetokokeesta saatavasta jännitys-venymäkuvaajasta. Puristuskokeessa  $\sigma_M = 0,1R_c$  ja vetokokeessa  $\sigma_M = 0,3R_t$  ( $R_t$  on materiaalin vetomurtolujuus). Neljännessä menetelmässä koe-kappaletta ensin puristetaan, kunnes jännitys ylittää arvon  $\sigma_m$  ( $\sigma_m = 0,3R_{it}$ ,  $R_{it}$  on materiaalin halkaisuvetomurtolujuus), jonka jälkeen kappaleesta määritetään halkaisukokeella halkaisuvetomurtolujuus  $R_{it}$ . Alhaisilla jännitystasoilla hydraulisesti sidotut materiaalit käyttäytyvät lineaarisesti, joten em. kolmen menetelmän voidaan kaikkien olettaa antavan saman E-moduulin arvon, joka on lähes sama kuin tangenttimoduulin arvo.



Kuva 15: Kimmomoduulin määrittäminen jännitys-venymäkuvaajasta CEN-normiluonnoksen / 10/ mukaan.



### 3.3.5 Säänkestävyys

#### Vedenkestävyys

BS on standardisoinut materiaaleille CBM1 ja CBM2 vesiupotuskokeen (BS 1924: Part 2: 1990), jota voidaan käyttää puristuskokeen ohella. Testiä varten valmistetaan kaksi samanlaista puristuskoe-kappalesarjaa, joita säilytetään vakiokosteudessa 7 vuorokautta. Tämän jälkeen toinen sarja upotetaan veteen 7 vuorokauden ajaksi, toista sarjaa säilytetään edelleen vakiokosteudessa. Kun koekappaleet ovat kahden viikon ikäisiä ne puristetaan. Mikäli vedessä säilytettyjen koekappaleiden lujuus on alle 80 % normaalisti säilytettyjen kappaleiden lujuudesta, on joko sideainemäärä liian pieni tai koekappaleet sisältävät liikaa lujuudenkehitykselle haitallisia komponentteja kuten sulfaatteja tai paisuvia savimineraaleja. / 30/.

ASTM-standardeissa sementtistabiloinnin hyvyyden kriteerinä ei käytetä puristuslujuutta, vaan tarvittava sideainemäärä määritetään kaksiosaisella rapautumestestillä, johon kuuluvat märkä-kuivakoe (ASTM D 559 / 6/) ja jäädytys-sulatuskoe (ASTM D 560 / 7/). Märkä-kuiva- ja jäädytys-sulatuskokeen läpäisevän materiaalin oletetaan olevan puristuslujuudeltaan vähintään 2 MPa, mutta puristuskoetta voidaan käyttää täydentävänä testinä. Märkä-kuiva- ja jäädytys-sulatuskoe muodostavat kokonaisuuden, jonka avulla arvioidaan materiaalien kestävyyttä, ja molemmat kokeet suoritetaan aina yhdessä. Märkä-kuivakokeessa koekappaleet altistetaan toistuvalla kastumiselle ja kuivumiselle ja jäädytys-sulatuskokeessa (kts. luku pakkasenkestävyys) toistuvalla jäätymiselle ja sulamiselle. Sama koeohjelma on myös AASHTO-standardeissa / 1, 2/.

Märkä-kuivakoe suoritetaan kahdelle sylinterimäiselle koekappaleelle ( $d = 104,6$  mm,  $h = 116,4$  mm), jotka valmistetaan optimivesipitoisuudessa norm. Proctor -tiiviuteen. Maksimiraekokoa ei ole määritetty, mutta yli 19 mm rakeet korvataan vastaavan painoisella määrällä lajitetta 4,75...19 mm. Ennen kokeen aloittamista koekappaleiden annetaan lujittua 7 vrk:ta kosteushuoneessa, jonka jälkeen ne upotetaan huoneenlämpöiseen veteen viideksi tunniksi. Tämän jälkeen märkiä kappaleita kuivataan uunissa (71 °C) 42 tuntia. / 6/.

Toista kuivista koekappaleista harjataan joka puolelta teräsharjalla (yht. 18-20 harjanvetoa) n. 13 N voimalla, jonka jälkeen kappale punnitaan massahäviön selvittämiseksi. Toisesta kappaleesta määritetään mittaamalla ja punnitsemalla tilavuuden ja vesipitoisuuden muutokset kokeen aikana. Koe koostuu 12 märkä-kuivasyklistä, jossa kappaleet upotetaan veteen 48 tunniksi ja kuivataan 42 tuntia. Jokaisen syklin jälkeen toista kappaletta harjataan. 12 syklin jälkeen koekappaleet kuivataan vakiopainoon ja määritetään kuivapaino. Sementin ja maan kanssa sitoutuneen veden määrä huomioidaan massahäviön laskennassa. / 6/. Kullekin maalajille sallitut massahäviöt on esitetty taulukossa 12. Maalajit on luokiteltu ASTM-/AASHTO-standardien mukaan. / 37/.

*Taulukko 12: Koekappaleiden sallitut massahäviöt ASTM:n märkä-kuivakokeessa / 37/. Taulukkoon on lisätty myös vastaavat suomalaisen maalajiluokituksen mukaiset maalajit.*

Maalajiryhmä	Suomalainen maalajiluokitus / 21/	Sallittu massahäviö (%)
A-1, A-2-4, A-2-5 ja A-3	kitkamaat	14
A-2-6, A-2-7, A-4 ja A-5	hiekk- ja silttimoreenit, siltti	10
A-6 ja A-7	savet	7

### Pakkasenkestävyys

Yksinkertaisin menetelmä varmistaa stabiloidun materiaalin pakkasenkestävyys on käyttää stabilointiin routimattomia materiaaleja. Näin menetellään esim. Hollannissa, jossa stabilointiin käytetään lähes ainoastaan routimattomista hyvälaatuista hiekkaa. Hollannissa näin voidaan tehdä, koska siellä hyvälaatuista hiekkaa on runsaasti saatavissa. / 17/. Useimmissa muissa maissa routimattomia materiaaleja ei ole riittävästi, jolloin joudutaan stabiloimaan myös routivia materiaaleja. Sementin lisäyksellä materiaalien routivuutta saadaan vähennettyä.

Sementillä sidotun materiaalin routanousukoe on standardisoitu ainakin Englannissa (BS 812: Part 124: 1989) ja Ranskassa (NF P 98-234-2:1994). Englannissa routanousukoe suoritetaan, jos stabiloitu kerros on alle 450 mm syvyydellä tien pinnasta. / 30/. Ranskalaisen normin mukaisessa routanousukokeessa Ø 150 mm lämpöeristetyin koekappaleen alapää on +2 °C vedessä, yläpään lämpötilaksi asetetaan -5,7 °C. Routimisherkkyttä arvioidaan routanousun, ajan ja lämpötilan perusteella. / 23/.

Stabiloidun materiaalin pidempiaikaista käyttäytymistä syklisen pakkasrasituksen alaisena arvioidaan jäätymis-sulamiskokeilla. Jäätymis-sulamiskoe on useissa maissa standardisoitu kansalliseksi standardiksi ja sitä käytetään joko rutiinitestinä tai tarpeen mukaan. Taulukossa 13 on esitetty eri maissa käytetössä olevia jäädytys-sulatuskokeita sekä jäätymis-sulamiskestävyysarvointiperiaatteita. Periaatteessa kaikki kokeet ovat samantyyppisiä: kovetuneita koekappaleita jäädytetään ja sulatetaan syklisesti, jonka jälkeen arvioidaan materiaalin jäädytys-sulatuskestävyys. Kokeen suoritustavoissa on eri menetelmien välillä kuitenkin eroja.

ASTM- / 7/ ja AASHTO-standardien / 2/ jäädytys-sulatuskokeet ovat toistensa kanssa samanlaiset. Saksalaiset / 35, 36/ ja ranskalaiset / 22/ ovat standardisoineet omat jäädytys-sulatuskokeensa. Itävallan / 26/ ja Sveitsin / 31/ jäädytys-sulatuskokeet perustuvat ASTM:n normiin ja saksalaiseen ohjeeseen. Lisäksi esimerkiksi Ruotsissa tien kulutuskerroksessa käytettävälle sementtibetonille sovelletaan SS-standardin mukaista betonin jäädytys-sulatuskoetta / 25, 32/. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa on enimmäkseen käytetty ASTM:n jäädytys-sulatuskoetta / 3, 5/. Eri maiden jäädytys-sulatuskokeissa laatuksiteereinä käytetään massahäviötä, pituuden muutosta sekä puristuslujuutta ja sen muutosta. CEN-normiluonnos jäädytys-



sulatuskokeesta on saksalaisen kokeen mukainen / 14/. Raja-arvot voivat kuitenkin vielä tarkentua. / 19/.

ASTM:n jäädytys-sulatuskoetta käytetään yhdessä märkä-kuivakokeen kanssa, kuten aikaisemmin mainittiin. Jäädytys-sulatuskokeella on arvoa jopa alueilla, joissa pakkasrasitusta ei esiinny, sillä siinä selviävät sellaiset rakenteen heikkoudet, jotka lämpötilan pysyessä nollan yläpuolella ilmenisivät ehkä hitaammin, mutta yhtä varmasti. / 37/.

Taulukossa 13 esitettyjen kokeiden lisäksi ainakin Jugoslaviassa ja Tsekko-slovakiassa käytetään jäädytys-sulatuskoetta. Jugoslaviassa jäädytys-sulatuskokeeseen kuuluu 14 sykliä lämpötiloissa  $-15^{\circ}\text{C}$  ja  $10^{\circ}\text{C}$ . Jäädytys-sulatuskokeen läpikäyneiden koekappaleiden puristuslujuuden tulee olla vähintään 80 % vertailukoekappaleiden lujuudesta. Tsekkoslovakiassa jäädytyslämpötilana käytetään  $-20^{\circ}\text{C}$  ja syklejä on vain 10. Siellä kriteerinä on 28 vrk:n puristuslujuus, jonka tulee olla 2,1...3,5 MPa. / 29/.



Taulukko 13: Eri maissa käytettävät jäädytys-sulatuskokeet / 2, 7, 22, 26, 31, 32, 35, 36/.

Maa ja standardi/ohje	Saksa TP BF - StB (1) TP HGT - StB (2)	USA ASTM D 560 - 89 (AASHTO T 136 - 70)	Ranska NF P 98-234-1
Koekappale (mm)	Ø 100, h = 120 (1) Ø 150, h = 125 (1) ja (2)	Ø 101,6, h = 116,4	Ø 160, h = 320 Ø 100, h = 200 (hiekal-le)
D <sub>max</sub> (mm)	20 (1) 31,5 (1) ja (2)	yli 19 mm lajite korvataan vastaavan painoisella määrällä lajitetta 4,75...19 mm	20
Tiivistystapa	norm. Proctor	norm. Proctor	par. Proctor
Vesipitoisuus	W <sub>opt</sub> ± 2* (1) 0,9W <sub>opt</sub> (2)	W <sub>opt</sub>	W <sub>opt</sub>
Säilytys ennen koetta	•15...25 °C muotissa haihtumiselta suojattuna, kunnes lujittuneet riittävästi •20 ± 2 °C, R <sub>h</sub> ≥ 95 % ristikolla, kunnes 28 vrk •4 h vedellä kyllästetyllä huovalla, 20 ± 2 °C, R <sub>h</sub> ≥ 95 %	7 vrk korteushuoneessa tippuvalta vedeltä suojattuna	•28 tai 60 vrk muotissa •24 h upotettuna 20 ± 2 °C veteen •1 h vaakasuorassa kuivaustelineellä, jonka jälkeen kappaleet kääritään polyeteenikalvoon
Jäädytysolosuhteet	ristikolla •20...0 °C, 2,5 ± 0,5 h •0...-15 °C, 5,5 ± 0,5 h •-17,5 ± 2,5 °C, ≥ 8 h	24 h matalassa astiassa vedellä kyllästetyllä huovalla, -23 °C	•10...-10 °C, ≥ 4 h •-10 ± 1 °C, 14 h
Sulatusolosuhteet	7 h vedellä kyllästetyllä huovalla, 20 ± 2 °C, R <sub>h</sub> ≥ 95 %	23 h matalassa astiassa vedellä kyllästetyllä huovalla, 21 °C, R <sub>h</sub> 100 %	•-10...10 °C, ≥ 2 h •10 ± 1 °C, 4 h
Syklien lkm	12	12	20
Kriteeri	Δl ≤ 1 ‰ 1. ja 12. syklin välillä	Δm kuten taulukossa 12	R <sub>c</sub> '/R <sub>c</sub> ≥ 0,7
Koekappaleiden lkm	3	2	3
Muuta	•pituuden mittaaminen ja punnitus ennen koetta sekä 1. ja 12. jäädytyksen jälkeen •sykliä välillä kappaleita käännetään 180 ° •koe suoritettava, jos < 0,063 lajitetta yli 5 p-%	•toista koekappaletta harjataan aina sulatuksen jälkeen •tilav. mittaaminen ja punnitus ennen koetta ja aina sulatuksen jälkeen •sykliä välillä kappaleita käännetään 180 °	•puristuslujuus määritetään sekä syklit läpikäyneistä (R <sub>c</sub> ') että kolmesta muotissa 20 ± 2 °C säilytetystä samanikäisestä vertailukoekappaleesta (R <sub>c</sub> )

Huom! R<sub>h</sub> suhteellinen ilmankosteus

\* Materiaalista riippuen, hienorakeisten vesipitoisuus yli ja karkearakeisten alle optimivesipitoisuuden.

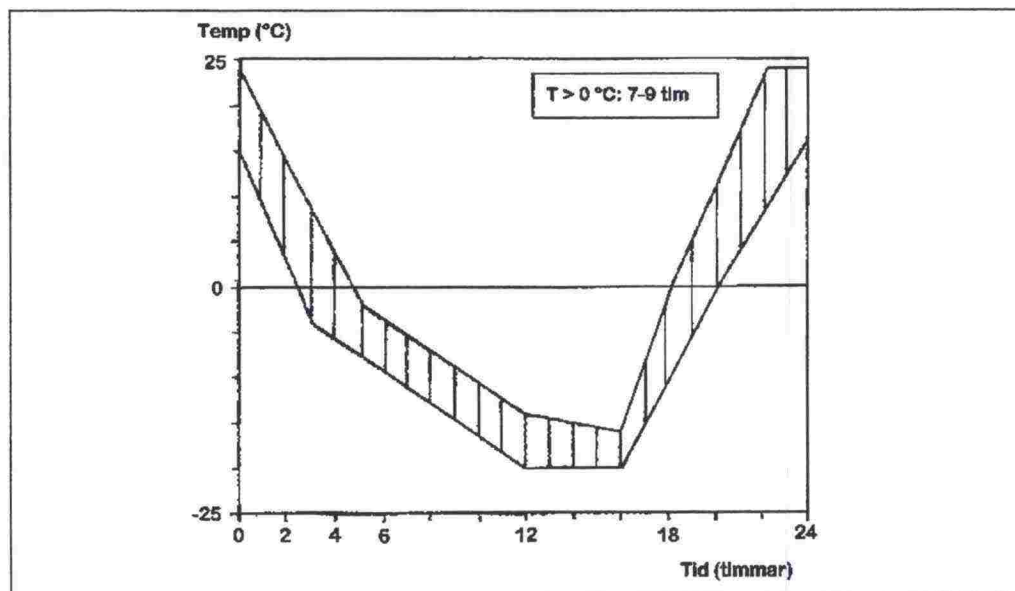
Taulukko 13 jatkuu seuraavalla sivulla.

*Jatkoa edelliseltä sivulta.*

Maa ja standardi/ohje	Sveitsi SN 640 509 a	Itävalta RVS 8.05.13	Ruotsi SS 13 72 44 menetelmä A, tapa III
Koekappale (mm)	Ø 101,6, h = 117	Ø 100, h = 120	Ø > 95, h = 50 ± 5 <sup>***</sup>
D <sub>max</sub> (mm)	16	Ø 150, h = 125 22/31,5 <sup>**</sup>	
Tiivistystapa	norm. Proctor	norm. Proctor	
Vesipitoisuus	w <sub>opt</sub>	w <sub>opt</sub>	
Säilytys ennen koetta	7 vrk huoneenlämmössä haihtumiselta suojattuna, muodonmuutokset estettävä	7 vrk, 20 °C, R <sub>h</sub> 100 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7 vrk, 20 ± 2 °C, R<sub>h</sub> 50 ± 10 %</li> <li>• tänä aikana liimataan kumimatto koekappaleen kaikille muille sivuille paitsi yläpintaan siten, että matto ulottuu 20 ± 5 mm yläpinnan yläpuolelle</li> <li>• 7 vrk:n jälkeen kaadetaan vesijohtovettä koekappaleen päälle n. 3 mm kerrokseksi ja annetaan imeytyä 3 ± 1 vrk:n ajan</li> <li>• koekappale lämpöeristetään muualta paitsi yläpinnaltaan</li> <li>• aikaisintaan 15 min ennen koetta pinnalla oleva vesi vaihdetaan 3 mm kerrokseksi 3 % NaCl-liuosta ja suojataan haihtumiselta kuvan 16 mukaan</li> </ul>
Jäädäytysolosuhteet	24 h kuivalla huovalla, -23 °C	24 h, -23 °C	
Sulatusolosuhteet	23 h vedellä kyllästetyllä huovalla, 20 °C, R <sub>h</sub> 98 %	24 h, 20 °C, R <sub>h</sub> 100 %	kuvan 16 mukaan
Syklien lkm	12	12	56
Kriteeri	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta m \leq 14/10/7 \%</math><sup>*</sup></li> <li>• <math>R_c \geq 2 \text{ MPa}</math></li> <li>• <math>R_c'/R_c \geq 1</math></li> </ul>	$\Delta l \leq 1 \%$ 1. ja 12. syklin välillä	$m_{56}/A \leq 0,1/0,5/1,0 \text{ kg/m}^2$ <sup>****</sup>
Koekappaleiden lkm	2		40 000 mm <sup>2</sup> /kerralla valettu pinta
Muuta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• toista koekappaletta harjataan aina sulatuksen jälkeen</li> <li>• punnitus ennen ja jälkeen kokeen</li> <li>• syklien välillä kappaleita käännetään 180 °</li> <li>• puristuslujuus määritetään sekä syklit läpikäyneistä (R<sub>c</sub>) että 7 vrk:n ikäisistä koekappaleista (R<sub>c</sub>), joita pidetään ennen koetta 4 h veteen upotettuina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pituuden mittaaminen ennen koetta sekä 1. ja 12. jäädäytysten jälkeen</li> <li>• koe suoritettava, jos &lt; 0,063 lajitetta yli 20 p-% ja/tai pehmeitä kiviaineksia yli 10 p-%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7, 14, 28, 42 ja 56 syklin jälkeen</li> <li>• yläpinnasta liuennut materiaali poistetaan ja kuivataan vakiopainoon 105 ± 5 °C:ssa (m<sub>n</sub>)</li> <li>• koekappaleen pinnalle kaadetaan uusi suolaliuos</li> </ul>

Huom! R<sub>h</sub> suhteellinen ilmankosteus<sup>\*</sup> Maalajista riippuen, karkearakeisille sallitaan suuremmat massahäviöt kuin hienorakeisille.<sup>\*\*</sup> Muotin koosta riippuen.<sup>\*\*\*</sup> Kappaleet porataan valmiista rakenteesta. Kappaleiden yläpinnasta sahataan ensin pois n. 20 mm, jonka jälkeen sylinterit vielä sahataan pituudeltaan sopiviksi.

\*\*\*\* Pakkasenkestävyys erittäin hyvä/hyvä/hyväksyttävä. Lisäksi luokissa hyvä ja hyväksyttävä oltava  $m_{56}/m_{28} < 2$ . Mikäli materiaali ei täytä hyväksyttävän luokan ehtoja se hylätään.



Kuva 16: Ruotsalaisen jäädytys-sulatuskokeen lämpötilat kokeen aikana / 32/.



## 4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tienpidon painopisteen siirtyessä yhä enemmän tieverkon kunnon ylläpitoon korostuu tiessä olevien materiaalien uudelleenkäyttö yhdessä paikallisten materiaalien kanssa. Myös kestävä kehityksen periaatteet ohjaavat materiaalien käyttöä. Perinteisten hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttö vähenee ja niiden käytölle asetetaan rajoituksia ja samalla niiden saatavuus vaikeutuu. Korvaavien nykyiset laatukriteerit alittavien materiaalien käyttö tulee tästä syystä lisääntymään. Merkittäväksi vaihtoehdoksi materiaalien hankinnassa tulee rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä saatavien materiaalien käyttö. Laadun parantamiseksi materiaali joudutaan usein käsittelemään joko mekaanisesti tai sitomalla se jonkin sideaineen avulla.

Uusien materiaalien käyttö edellyttää ajantasalla olevia laatukriteerejä ja niihin liittyviä tutkimusmenetelmiä. Lisäksi nykyisin käytössä olevasta tielaitoksen Sementtistabilointiohjeesta / 28/ puuttuvat täsmälliset ohjeet siitä, kuinka ilmasto-olosuhteiden vaikutukset tulisi huomioida hydraulisesti sidotuissa kerroksissa. Tämän kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli selvittää sementtistabiloinnin laadunvarmistusta eri maissa. Erityisesti haluttiin selvittää käytössä olevia sementtistabiloinnin jäädytys-sulatuskestävyyttä koskevia testimenetelmiä ja laatukriteereitä.

Sementtistabilointi eroaa betonoinnista siten, että stabiloinnissa sementtipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin betonissa ja lujitettava maa-aines ei ole betonisoran kaltaista suhteistunutta kiviainesta. Stabiloinnin tavoitteena on parantaa maan ominaisuuksia mm. eroosion kestävyden ja routivuuden osalta. Tärkein tavoite on kuitenkin lujuuden lisääminen.

Sementtistabiloinnin lujuus perustuu sementin aiheuttaman sisäisen kitkulman ja koheesion kasvuun maarakeiden välillä. Stabiloinnin lujuuteen vaikuttavat kemialliset tekijät, kuten runkoaineessa esiintyvät kemialliset yhdisteet ja orgaanisen aineksen määrä, ja fysikaaliset tekijät, kuten stabilointimassan tiiviys ja vesipitoisuus sekä sideaineen ja hienoaineuksen määrä. Lisäksi stabiloinnin lujuuteen vaikuttavat ulkoiset tekijät, joista tärkeimmät ovat hydratoitumisen aikainen lämpötila sekä ulkoinen vedensaanti.

Jotta sementtistabilointia ja sen laadunvarmistusta voidaan vertailla eri maiden välillä, on tunnettava eri maiden stabilointimenetelmiä ja -terminologiaa. Sementtistabilointia koskeva terminologia on epäyhtenäistä ja sama termi voi maasta riippuen tarkoittaa aivan eri tyyppistä stabilointia. Toisaalta yhdellä termillä voi myös saman maan sisällä olla useita eri merkityksiä. Periaatteessa useimmissa maissa tienrakennuksessa käytetään kolmen tyyppistä stabilointia: heikkolaatuisen maan stabilointi (pohjamaa, suodatinkerros), tien rakennekerrosten (jakava, kantava) vaatimukset täyttävä stabilointi sekä edellistä korkeammat vaatimukset täyttävä hyvälaatuinen stabilointi (kulutuskerros, kantava kerros raskaasti liikennöidyillä teillä), joka vastaa jo lähes laihaa betonia.

Yleisimmin sementillä stabiloitujen materiaalien laatua arvioidaan lujuustestien perusteella. Lujuutta voidaan testata usealla eri tavalla, joista yksiaksiaalisella puristuskokeella määritetty puristuslujuus on yleisimmin käytetty. Lujuus voidaan määrittää myös vetolujuutena veto-, halkaisuveto- tai taivutusvetokokeella. Eri maiden lujuuskriteerit eivät kuitenkaan ole suoraan verrattavissa keskenään, koska mm. koekappaleiden koko ja muoto sekä valmistus- säilytys- ja koestusmenetelmät vaihtelevat.

Sementtistabiloinnin kantavuusominaisuuksien arviointiin käytetään CBR-koetta sekä erilaisia kimmomoduulin määrittämismenetelmiä. CBR-koetta käytetään lähinnä heikkolaatuisten materiaalien stabiloinnin laadunvarmistukseen. Kimmomoduulin määrittämismenetelmän valinta riippuu testattavan materiaalin lujuudesta sekä maksimiraekoosta. Kimmomoduuli voidaan laboratoriossa määrittää yksi- tai kolmiaksiaalikokeella, taivutuskokeella, resonant-column -menetelmällä tai electro-dynamic -menetelmällä. Useimmissa testeissä moduuli ilmaistaan staattisena E-moduulina, poikkeuksena ovat dynaaminen kolmiaksiaalikoe sekä resonant-column -menetelmä, joiden tulokset ilmaistaan Mr- ja G-moduulina. Koska lujuudeltaan samanlaisten materiaalien kimmomoduuli vaihtelee huomattavasti eri stabilointityyppien välillä, ei materiaalien luokittelu yksinomaan lujuuden perusteella ole tienrakennuksen kannalta tarkoituksenmukaista.

Sementtistabiloinnin säänkestävyys on myös eräs yleisesti käytetty laadunvarmistuksen kriteeri. Säänkestävyystesteihin lasketaan kuuluvaksi vedenkestävyystestit (vesiupotuskoe ja märkä-kuivakoe) sekä pakkasenkestävyystestit (routanousu- ja jäädytys-sulatuskoe). Säänkestävyyttä tutkitaan yleensä jonkun muun ominaisuuden (esim. lujuus) ohella tai tarvittaessa. ASTM-normien mukainen sementtistabiloinnin laadunvarmistus koostuu yksinomaan säänkestävyystesteistä.



## 5 KIRJALLISUUS

- / 1/ AASHTO designation T 135-70 Standard methods of wetting-and-drying test of compacted soil-cement mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1970. 6 s.
- / 2/ AASHTO designation T 136-70 Standard methods of freezing-and-thawing tests of compacted soil-cement mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1970. 6 s.
- / 3/ Alkio, R. Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. Tielaitoksen selvityksiä 62/1992. Tielaitos, Tiehallitus, tutkimuskeskus & VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Helsinki 1992. 28 s., 4 liitettä. TIEL 3200112. ISBN 951-47-6632-6.
- / 4/ Alkio, R. Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. Tielaitoksen selvityksiä 41/1993. Tielaitos, Geokeskus. Helsinki 1993. 35 s., 29 liitettä. TIEL 3200166. ISBN 951-47-7678-X.
- / 5/ Alkio, R. Stabiloidun moreenin pakkaskestävyys. Tutkimusselostus 551. VTT. Espoo 1983.
- / 6/ ASTM designation D 559-89 Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. The American Society for Testing and Materials. 1989. 5 s.
- / 7/ ASTM designation D 560-89 Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures. The American Society for Testing and Materials. 1989. 5 s.
- / 8/ ASTM designation D 1632-87 Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory. The American Society for Testing and Materials. 1987. 5 s.
- / 9/ ASTM designation D 1633-84 Standard test method for compressive strength of molded soil-cement cylinders. The American Society for Testing and Materials. 1989. 5 s.
- / 10/ CEN/TC 227/WG 4 N 169 E Proposal of TG 4 for Draft European Standard on "Hydraulic bound mixtures (HBM) - Test method for the determination of the modulus of elasticity - Part 1: Modulus of elasticity in compression or in tension". European Committee for Standardization. 1995. 7 p.



- 
- / 11/ CEN/TC 227/WG 4 N 179 E Proposal of TG 4 for Draft European Standard on "Hydraulic bound mixtures (HBM) - Test method for the determination of the direct tensile strength". European Committee for Standardization. 1995. 6 p.
- / 12/ CEN/TC 227/WG 4 N 180 E Proposal of TG 4 for Draft European Standard on "Hydraulic bound mixtures (HBM) - Test method for the determination of the compressive strength". European Committee for Standardization. 1995. 8 p.
- / 13/ CEN/TC 227/WG 4 N 181 E Proposal of TG 4 for Draft European Standard on "Hydraulic bound mixtures (HBM) - Test method for the determination of indirect tensile strength". European Committee for Standardization. 1995. 7 p.
- / 14/ CEN/TC 227/WG 4 N 187 E German proposal for a test method on freeze-thaw resistance of hydraulically bound bases. European Committee for Standardization. 1995. 13 p.
- / 15/ CEN/TC 227/WG 4 N 215 E Cement bound granular mixtures for road bases and subbases. 7th draft. European Committee for Standardization. 1996. 15 p.
- / 16/ Croney, D., Croney, P. The design and performance of road pavements. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company Europe. Berkshire 1991. ISBN 0-07-707408-4.
- / 17/ Jonker, C. Cementstabilisation in Holland. Presentation paper of PTL meeting. Linköping 1986. 13 p.
- / 18/ Judycki, J. Structural characterization of road base materials treated with hydraulic binders. Hydraulisten sideaineiden vaikutus kantavan kerroksen ominaisuuksiin. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja no. 12. Oulun yliopisto. Oulu 1991. 111 p. ISBN 0785-4137.
- / 19/ Krass, K. Europäische Normen für Mineralstoffgemische im Strassenbau. Strasse + Autobahn. 1993. Vol. 44, no. 6, p. 375-376.
- / 20/ Lindgren, P. Tierakenteiden stabilointi sementillä. HTTK, Tietekniikka. Otaniemi 1980. 87 s.
- / 21/ Moreenin jalostaminen. Tielaitoksen selvityksiä 77/1993. Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. Oulu 1993. TIEL 3200201. ISBN 951-47-8136-8.
- / 22/ NF P 98-234-1 (Norme Francaise) Tests relating to pavements - Freezing behaviour of materials treated with hydraulic binders -

Part 1: Freezing-thawing test of stabilized gravel or sand. l'association francaise de normalisation (afnor). April 1992. 6 p.

- / 23/ NF P 98-234-2 (Norme Francaise) Tests relating to pavements - Behaviour against frost - Part 2: Frost heaving test of soils or granular treated or non treated materials with D 20 mm. Draft. la commission de normalisation. 1994. 15 p.
- / 24/ Rahiala, J. Maabetoni ja betonipäällysteet; käytössä maailmalla, sopivatko Suomeen? Tie- ja vesirakennushallitus. Helsinki 1988. 275 s. TVH 723867.
- / 25/ Remissutgåva, BYA 92 (Vägverkets Byggnadstekniska Allmänna beskrivningar för väg 1992), Kapitel 7, Cementbundna lager. Vägverket, Sektion Vägteknik. 1992. 24 s.
- / 26/ RVS 8.05.13 Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau - guidelines and directions for road construction "Cement Treated Subbases".
- / 27/ Schmidt, M. Hydraulisch gebundene Tragschichten nach ZTVT und RStO. Strasse + Autobahn. 1985. Vol. 36, no. 11, p. 460-464.
- / 28/ Sementtistabilointiohje. Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Tiehallitus. Helsinki 1992. 45 s., 5 liitettä. TIEL 2222614. ISBN 951-47-6848-5.
- / 29/ Seminar on semi-rigid pavements, preliminary report. Proceedings of XVIIIth World Road Congress. Brussels 1987. PIARC 1987. 61 p.
- / 30/ Sherwood, P. T. Soil stabilization with cement and lime. State-of-the-art review. TRL, Department of Transport. 2nd ed. Her Majesty's Stationery Office. London 1995. 153 p. ISBN 0-11-551171-7.
- / 31/ SN 640 509 a (Schweizer Norm) Stabilisierung, Stabilisierung mit hydraulischen Bindemitteln. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS). Zürich Februar 1985. 12 s.
- / 32/ SS 13 72 44 (Svensk Standard) Betongprovning - Hårdnad betong - Frostresistens. Standardiseringskommissionen i Sverige, Byggstandardiseringen. April 1988. 6 s.
- / 33/ Suggested Specifications for soil-cement base course (soil-cement, cement-treated base, cement-treated-aggregate base). In: Soil-Cement Information, PCA. 1981.

- / 34/ Suomalainen sementti. Finnsementti Oy. 1996. 36 s.
- / 35/ TP BF-StB Teil B 11.1 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Strassenbau, Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. 1986. 15 s.
- / 36/ TP HGT-StB 86 Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT). Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstrassen. 1986. 23 s.
- / 37/ Williams, R. I. T. Cement-treated pavements: materials, design and construction. Elsevier Applied Science Publishers Ltd. Essex 1986. ISBN 1-85166-018-6.



## **TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA**

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
- 2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

## **TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ**

- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysten seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyyssrakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 38/1996 Rakenneratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- 78/1996 Moreenin rakeistaminen pelleteimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
- 4/1997 Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
- 5/1997 Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
- 11/1997 Betonipäälysteen seuranta vt 4 Kempele-Kiviniemi. Kuntoraportti TIEL 3200458
- 23/1997 Masuunihiekan käyttö päälysrakennekerroksissa. TIEL 3200470
- 30/1997 Teiden pohjavesisuojausosissa käytettävien maatiivisteiden vedenläpäisevyyden määrittäminen. TIEL 3200476
- 35/1997 Palaturpeen käyttö tierakenteessa. TIEL 3200481
- 23/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1: Sementillä sidotut materiaalit, kirjallisuusselvitys. TIEL 3200514
- 24/1998 hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 2: Sementillä sidottujen materiaalien jäätymis-sulamiskestävyys. TIEL 3200515
- 25/1998 Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 3: Koekappaleiden valmistuksen ja säilytyksen vaikutus sementillä sidotun materiaalin lujuuteen. TIEL 3200516
- 29/1998 Sementtistabiloidut materiaalit, loppuraportti. TIEL 3200521
- (*Geotekniikan informaatiojulkaisuja:*)
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
- 79/1996 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446
- 18/1997 Syvästabiloinnin mitoitusohje. TIEL 3200465
- 28/1997 Tien kevennysrakenteet. TIEL 3200475